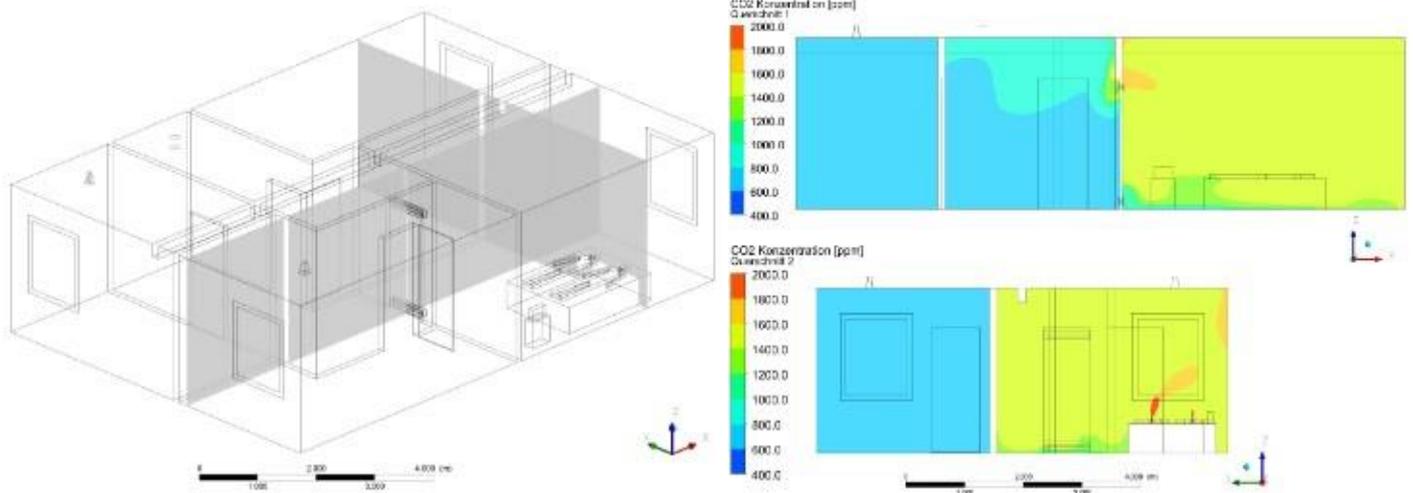


Schlussbericht, 27. Mai 2022 (Rev. B; 28.12.2022)

# Analyse vereinfachter Lüftungskonzepte



**Autoren**

Marie-Teres Moser, HSLU

Alex Primas, HSLU

Andrii Zakovorotnyi, HSLU

**Begleitgruppe**

Adrian Grossenbacher, BFE

Franz Sprecher, AHB

Robert Minovsky, Minergie

Diese Studie wurde mit Unterstützung von EnergieSchweiz erstellt.

**Kofinanzierung**

Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Lindenhofstrasse 21, 8001 Zürich

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

## Vorwort

Um eine gute thermische Behaglichkeit für die Bewohner eines Gebäudes zu erreichen, wird die Aussenhülle möglichst luftdicht gebaut. Auch bei Sanierungen wird darauf geachtet, eine dichte Gebäudehülle zu schaffen, beispielsweise durch den Einbau von dichterem Fenstern. Dadurch akzentuiert sich die Problematik der korrekten Lüftung, die einen regelmässigen Nutzereingriff (Tag und Nacht) durch Fensterlüftung erfordert, um den notwendigen hygienischen Luftwechsel sicherzustellen. Aus gesundheitlicher Sicht ist es wichtig, dass die menschlichen Stoffwechsel-Abfallprodukte durch ein geeignetes Lüftungskonzept aus den Innenräumen abgeführt werden. Insbesondere in kleinen und dicht belegten Räumen, wie z.B. bei Schlafzimmern, ist ein ausreichender Luftwechsel daher wichtig. Damit keine Energie verloren geht, werden zunehmend Wärmerückgewinnungsanlagen in die Lüftungssysteme integriert. Mit vereinfachten und effizienten Systemen zur Luftverteilung soll erreicht werden, dass bei Modernisierungen die Energieeffizienz gesteigert aber der Materialbedarf und die Eingriffstiefe reduziert werden. Neben der geforderten Energieeinsparung erhöht dies den Wohnkomfort, verhindert Bauschäden und reduziert die Investitionskosten.

### Danksagung

Für den Informationsaustausch und Anregungen danken wir der Begleitgruppe.

Für den Austausch und insbesondere für die Bereitschaft, für das Projekt Messungen in der Forschungswohnung durchzuführen, danken wir Markus Wirnsberger, Cindy Hesel und Harald Krause von der Technischen Hochschule Rosenheim.

# Zusammenfassung

## Ausgangslage

Um eine Lüftungsanlage auch bei beschränkten Platzverhältnissen für Installationen wie z.B. bei Altbauansanierungen ohne hohe Aufwendungen für die Installationen und den damit verbundenen Kosten realisieren zu können, werden Anlagenkonzepte mit vereinfachter Luftführung diskutiert und auch realisiert. Seit 2019 lässt Minergie bei Modernisierungen Lüftungskonzepte zu, bei welchen der Luftaustausch über offene Türen aus einem gemeinsamen Korridor bzw. Wohnbereich mit Zuluftversorgung erfolgt. Für diese passiven Verteilkonzepte liegen derzeit keine Untersuchungen zur Funktion, deren Wirksamkeit und Grenzen vor. Kritisch sind dabei vor allem kleine und dicht belegte Räume, wie z.B. Schlafzimmer. Je weniger Luftvolumen pro Person zur Verfügung steht, umso kürzer wird das notwendige Lüftungsintervall.

## Ziel und Vorgehen

Ziel der Arbeit ist die Aufarbeitung des Wissenstandes und die Analyse von Luftführungskonzepten mit minimiertem Aufwand für die Luftverteilung innerhalb der Wohnung. Neben der Auswertung der relevanten Literatur werden die offenen Fragen zur Wirksamkeit und Grenzen dieser vereinfachten Luftführungskonzepte mittels Simulationen und Messungen untersucht.

Die Messungen zur Lüftungswirksamkeit (Indikator CO<sub>2</sub>) erfolgen einerseits in zwei Wohnungen eines realisierten Objektes und andererseits in einer bewohnten Testwohnung, um verschiedene Varianten der passiven Überströmung zu untersuchen. Parallel dazu werden mit zwei CFD-Simulationsmodellen verschiedene Szenarien analysiert, um Antworten bezüglich Lüftungswirksamkeit und den Grenzen der Konzepte zu finden. Zur Validierung der Simulationen sowie um weitere Einflussfaktoren zu ermitteln, werden Messungen in einer mit der Simulation vergleichbaren Laborumgebung (Musterwohnung «ROTEG» im Labor der TH Rosenheim) sowie der Testwohnung (reale Belegung, teilkontrollierte Messbedingungen) durchgeführt.

## Hauptergebnisse

Aus der Untersuchung können folgende Hauptergebnisse zusammengezogen werden:

- In Wohnungen mit offenen Zimmertüren erfolgt ein rascher Ausgleich der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aus den verschiedenen Räumen. Dies zeigt auch Abbildung 1 in der Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den nachts belegten Zimmern der beiden untersuchten Wohnungen.
- Die Messungen im realisierten Gebäude zeigen, dass die Bewohner insbesondere nachts die Innentüren oft geschlossen halten. Damit funktioniert der Luftaustausch über offene Türen nicht mehr. Dies ist aus der Auswertung in Abbildung 1 insbesondere für Wohnung 2 ersichtlich.

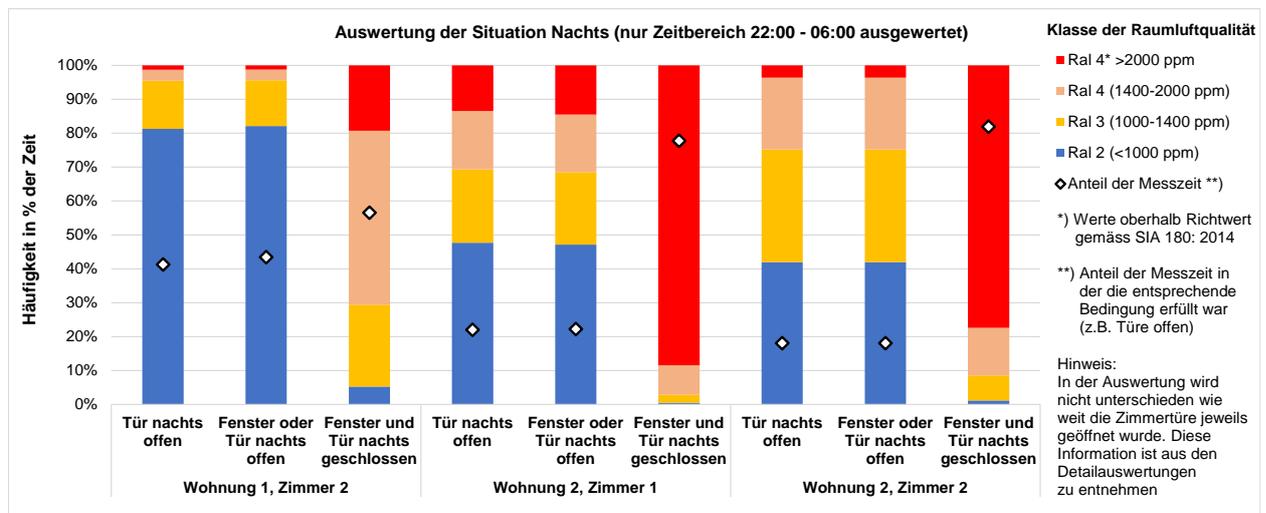


Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Auswertung verschiedener Fälle

- Bereits bei wenig geöffneten Türen ist eine erhebliche Wirkung auf den Luftaustausch zu erkennen. Insbesondere bei Türöffnungen von 10 cm oder mehr ist der Luftaustausch zwischen Zimmer und Korridor bereits wirksam und kann Spitzen in der Luftbelastung brechen. Abbildung 2 zeigt dazu die Resultate aus den Messungen in der Testwohnung.
- Um bei geschlossenen Türen mit einem passiven Überströmelement einen befriedigenden Luftaustausch zu erreichen, sind grosse Elementquerschnitte (freier Querschnitt ca. 0.1 m<sup>2</sup> oder mehr), eine Anordnung in Boden und Deckennähe (je 50% der freien Fläche) und sehr geringe Druckverluste über das Element (im Bereich von 0.1 Pa) erforderlich. Abbildung 3 zeigt dazu die Resultate aus den Messungen mit Überströmelementen in der Testwohnung.

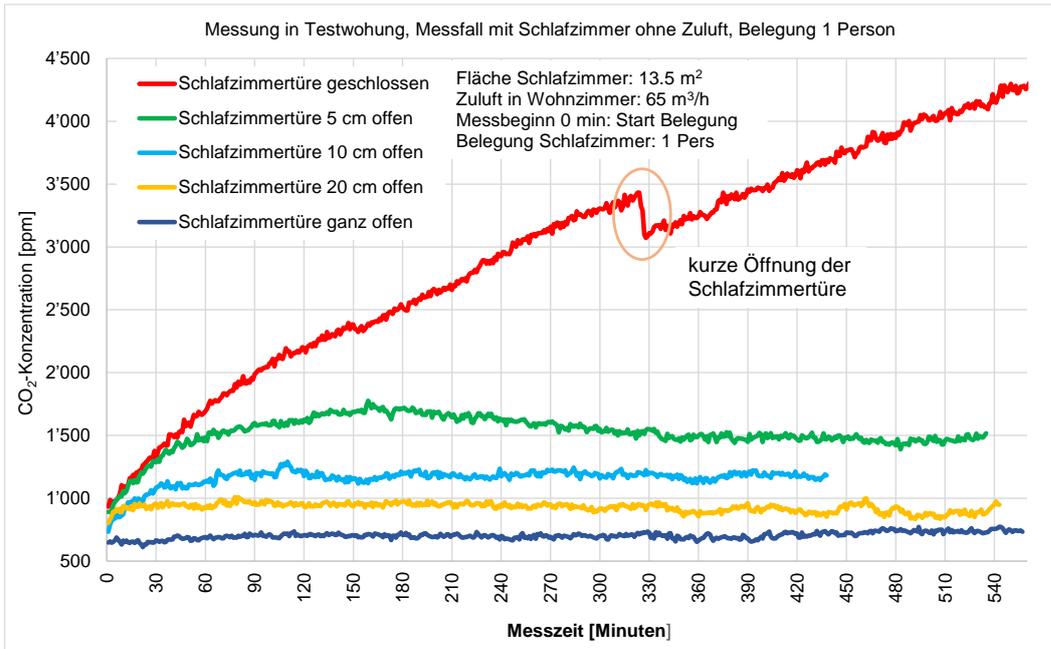


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Vergleich verschiedener Türöffnungsweiten

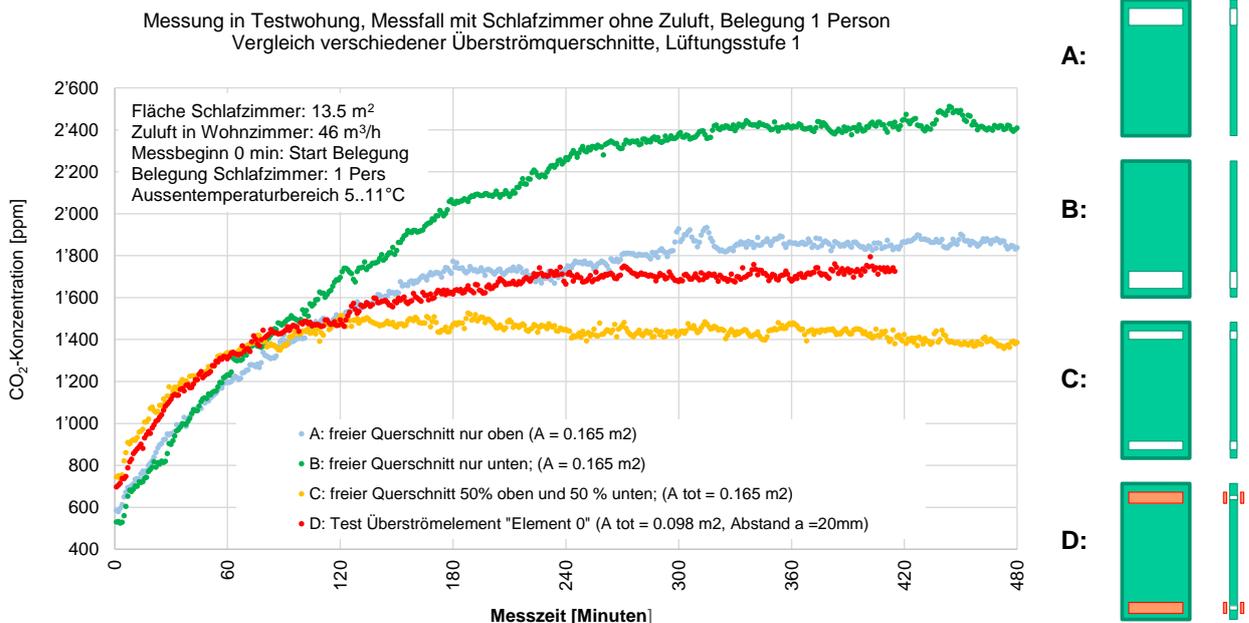


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Vergleich verschiedener Überströmquerschnitte

- Messungen und Simulationen mit einem Element, vergleichbar wie es am Markt verfügbar ist, zeigen, dass damit die hohen Spitzen der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer (oft deutlich über 2000 ppm) am frühen Morgen (bei geschlossenen Fenstern) durch den Luftaustausch zwischen Zimmer und Korridor gebrochen werden können.
- Aus den Messungen zeigte sich aber auch, dass die Wirkung stark von den Umgebungsbedingungen abhängig ist und insbesondere bei höheren Aussentemperaturen schlechter funktioniert. Dies ist auf die in diesem Fall geringeren Temperaturdifferenzen zwischen den Räumen zurückzuführen, die als Antrieb für den Luftaustausch wirken.
- Alle Messungen wurden mit CO<sub>2</sub> als Indikatorgas für die Luftqualität durchgeführt. Die Messungen in der Testwohnung zeigten, dass Gerüche nicht gleich effizient abgeführt werden. Qualitative Vergleiche zeigten, dass auch nach einem Abklingen der CO<sub>2</sub>-Werte über den Tag im Schlafzimmer ohne Belegung von 2100 auf 600 ppm Geruchsemissionen noch deutlich wahrgenommen werden. Diese Effekte konnten im Rahmen des Projektes jedoch nicht vertieft untersucht werden.
- Aus dem Vergleich zwischen den Messungen in realen Wohnungen und den Messungen in Laborumgebung mit Dummys bzw. mit der CFD-Simulation wurden erhebliche Differenzen festgestellt, welche die Interpretation bzw. Übertragung dieser Ergebnisse auf reale Situationen stark erschwert.

### **Ausblick**

Aus der Arbeit zeigen sich die Nachteile und Grenzen der passiven Überströmung durch Zimmertüren gut. Es zeigt sich aber auch, dass der passive Luftaustausch durch Überströmelemente bei entsprechenden Bedingungen durchaus wirksam ist. Bei einfachen Zimmertüren ist insbesondere der Einfluss der Nutzer entscheidend. Die erhaltenen Resultate können für die Weiterentwicklung von Elementen zur passiven Überströmung genutzt werden und die Umsetzung von vereinfachten Lüftungskonzepten unterstützen.

Die wichtigsten in diesem Bericht dokumentierten Erkenntnisse sollen als Informationen für Planer und Bauherrschaften in Veranstaltungen und Weiterbildungen von Minergie einfließen. Ebenso wird dies zum einen für die zukünftigen Anforderungen von Minergie relevant sein aber auch für die Weiterentwicklung von Komponenten, welche in der normalen Baupraxis eingesetzt werden könnten.

Um das untersuchte System weiterzuentwickeln, wäre in einem ersten Schritt eine Überprüfung der Studienergebnisse an einem real bewohnten Gebäude sinnvoll. Nur so kann eine gewisse Sicherheit erlangt werden, dass das in der Untersuchung verwendete Überströmelement auch in der Praxis tauglich ist und die erwartete Wirkung zeigt. Dabei sollte begleitend auch untersucht werden, ob eine Optimierung des Elementes möglich und auch wirksam ist. Dafür wäre ein Vergleich mit einem aktiven Überströmer sinnvoll.

# Résumé

## Situation initiale

Dans le cadre de la rénovation de bâtiments existants, la mise en œuvre de systèmes de ventilation avec récupération de chaleur rencontre souvent des difficultés en raison de l'encombrement de la distribution d'air dans le logement. C'est pourquoi des concepts avec une distribution d'air simplifiée sont proposés et mis en œuvre. Dans ce concept la totalité du débit d'air fourni est introduite dans le couloir ou la pièce ouverte du logement adjacente aux chambres. Ainsi, il est possible de réduire la quantité de gaines utilisées pour les installations et les coûts associés. Lors de la rénovation de bâtiments résidentiels, Minergie admis des systèmes d'aération avec le transfert d'air par les portes ouvertes au sein d'une unité d'habitation. Lorsque les portes sont ouvertes, le mouvement naturel de l'air assure l'échange d'air entre la zone d'air fourni et les chambres. Particulièrement critiques à cet égard sont les pièces petites et densément occupées, comme les chambres à coucher. Actuellement, il n'existe aucune étude ayant examiné l'efficacité et les limites de tels concepts de distribution de l'air fourni.

## Objectif et approche

L'objectif du projet est d'analyser l'efficacité du renouvellement de l'air dans les logements avec des concepts d'aération utilisant des éléments de transfert d'air passives. Dans un premier temps, une recherche bibliographique a été effectuée. L'analyse est effectuée au moyen de mesures et de simulations. L'objectif est d'aborder les possibilités et les limites de tels concepts.

Les mesures de l'efficacité de la ventilation (CO<sub>2</sub> comme indicateur) sont effectuées, d'une part, dans deux appartements habités d'un immeuble d'habitation et, d'autre part, dans un appartement expérimental. Les mesures dans l'immeuble d'habitation sont effectuées pendant l'utilisation normale par les résidents. Afin d'étudier différents types d'éléments de transfert d'air passif, des mesures sont effectuées dans l'appartement expérimental. Cela permet d'obtenir des résultats dans un environnement avec une occupation réelle mais des conditions de mesure partiellement contrôlées. Parallèlement, différents scénarios sont analysés à l'aide des simulations CFD. Le but de la simulation est de trouver les paramètres importants qui influencent l'efficacité de la ventilation et les limites de ces concepts. Afin de valider les simulations et de déterminer d'autres facteurs d'influence, des mesures sont effectuées dans un environnement de laboratoire comparable à la simulation (appartement expérimental "ROTEG" du laboratoire de l'université technique des sciences appliquées de Rosenheim).

## Principaux résultats

Les principaux résultats peuvent être résumés comme suit :

La Figure 4 présente les résultats de trois pièces dans les deux appartements analysés.

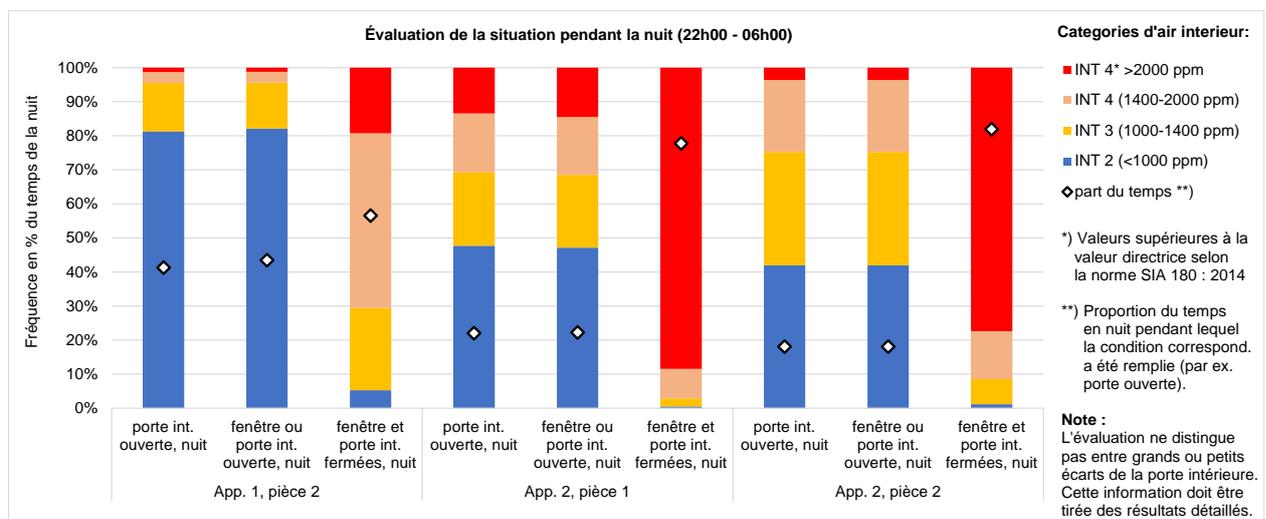


Figure 4: Distribution de fréquence de la concentration de CO<sub>2</sub> en % de la nuit (22h00-6h00) ; évaluation de différentes situations

- Le diagramme en Figure 4 montre la distribution de fréquence des concentrations de CO<sub>2</sub> dans les chambres occupées la nuit pour différentes situations.
- Les mesures montrent que les résidents gardent souvent les portes intérieures fermées, surtout la nuit. En conséquence, le renouvellement d'air est insuffisant dans ces pièces. Ceci est visible sur la Figure 4, en particulier pour l'appartement 2.
- Des portes déjà légèrement ouvertes peuvent avoir un effet considérable sur l'efficacité du renouvellement de l'air. En particulier si dont la largeur d'ouverture (fente) de la porte intérieure est de 10 cm ou plus, l'échange d'air entre la pièce et le couloir est déjà efficace. Ça peut briser les pics de concentration en CO<sub>2</sub> à l'intérieur de la pièce. La Figure 5 présente les résultats des mesures effectuées dans l'appartement expérimental.

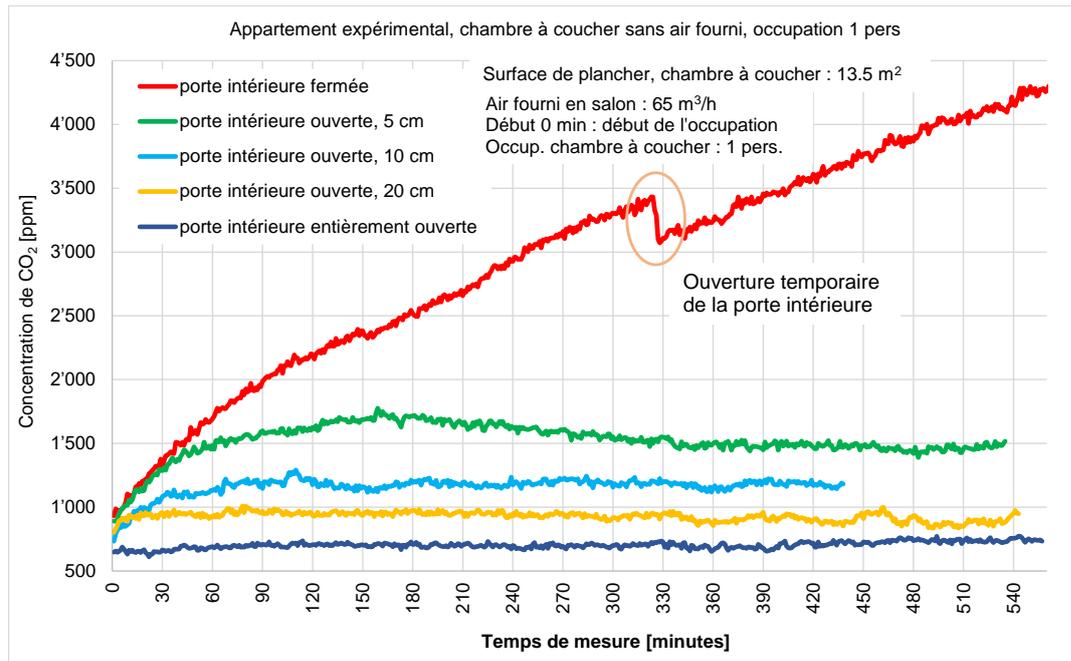


Figure 5: Evolution des concentrations en CO<sub>2</sub>, chambre à coucher, période nocturne, différentes situations de la porte intérieure

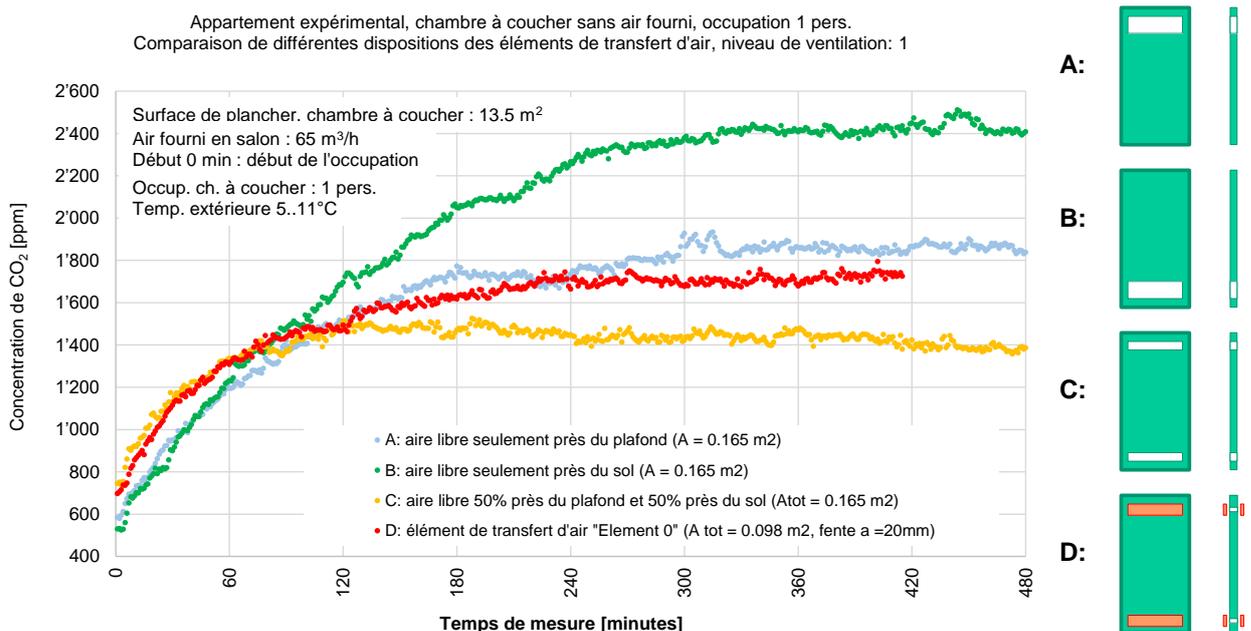


Figure 6: Evolution des concentrations en CO<sub>2</sub>, chambre à coucher, période nocturne, disposition des éléments de transfert d'air.

- Pour obtenir une efficacité du renouvellement de l'air satisfaisant aussi avec des portes intérieures fermées, il faut un élément de transfert d'air avec une aire libre suffisante (d'environ 0,1 m<sup>2</sup> ou plus). Il est important que les ouvertures soient placées près du sol et du plafond (50 % de l'aire libre chacun) et que les éléments aient une faible perte de charge (de l'ordre de 0,1 Pa). La Figure 6 présente les résultats des mesures effectuées dans l'appartement expérimental avec différentes dispositions des éléments de transfert d'air.
- Les mesures et les simulations effectuées avec un élément de transfert d'air passif comparable à ceux disponibles sur le marché montrent que les pics élevés de concentration de CO<sub>2</sub> (bien supérieurs à 2000 ppm) peuvent être nettement réduits. Ces pics se produisent tôt le matin dans une chambre à coucher dont le fenêtrage et la porte sont fermés.
- Toutefois, les mesures ont également montré que l'effet dépend fortement des conditions ambiantes et qu'il est moins efficace lorsque la température extérieure est élevée. Dans ce cas, les différences de température plus faibles entre les différentes pièces du logement réduisent la différence de pression induite thermiquement et donc le renouvellement de l'air.
- Toutes les mesures ont été effectuées avec du CO<sub>2</sub> comme gaz indicateur pour le renouvellement de l'air. Des comparaisons qualitatives effectuées dans l'appartement expérimental indiquent que les odeurs ne sont pas éliminées avec la même efficacité. Cet effet a été observé lors de la mesure des courbes de décroissance (des concentrations de CO<sub>2</sub> de 2100 à 600 ppm) pendant la journée en l'absence d'occupants. Les émissions d'odeurs étaient encore clairement perçues par la suite. Cependant, ces effets n'ont pas pu être étudiés en détail dans le cadre de ce projet.
- La comparaison entre les mesures dans les appartements occupés par des personnes et les mesures dans l'environnement de laboratoire avec des mannequins d'essai, respectivement la simulation CFD, montre des différences considérables. Cela a rendu difficile l'interprétation ou le transfert des résultats des situations de laboratoire aux situations réelles dans le bâtiment occupé.

## Perspectives

L'étude montre les limites et les inconvénients du renouvellement de l'air à travers les portes intérieures ou les éléments de transfert d'air passif. Cependant, l'analyse montre également que le renouvellement de l'air à travers de tels éléments est assez efficace pour prévenir les concentrations élevées de CO<sub>2</sub> dans des conditions appropriées. Dans le cas d'une simple porte intérieure, l'influence du comportement de l'utilisateur est déterminante. Les résultats peuvent être utilisés pour le développement ultérieur d'éléments de transfert d'air passif et soutenir la mise en œuvre de concepts avec une distribution d'air simplifiée dans le logement.

Les résultats les plus importants peuvent être utilisés comme information pour les planificateurs et les propriétaires de bâtiments dans les événements et les cours de formation Minergie. Ils seront également pertinents pour les exigences futures des concepts d'aération Minergie et pourront être utilisés pour le développement de ces concepts.

Pour la poursuite du développement du système étudié, il serait bon de vérifier les résultats de l'étude sur un bâtiment réel et habité. De cette façon, il peut être prouvé avec un certain degré de certitude que l'élément de transfert d'air passif utilisé dans l'étude est également adapté à des applications réelles et montre l'efficacité attendue. En même temps, les possibilités d'amélioration d'un tel élément doivent être étudiées. A cette fin, une comparaison avec un élément de transfert d'air actif (déverseur actif) serait utile.

# Abstract

## Introduction

Within renovation of existing buildings, the implementation of ventilation systems with heat recovery often experiences difficulties due to the space requirements for the air distribution within the dwelling. Therefore, concepts with simplified air ducting are proposed and implemented to reduce the amount of ductwork used for the installations and the associated costs. Since 2019, Minergie permits ventilation concepts for modernisations with supply air only in a common corridor or living area and an air distribution within the flat via open interior doors. Currently no studies that investigated the effectiveness and limits of such concepts of passive air distribution exist. Particularly critical are small, densely occupied rooms, such as bedrooms.

## Aim and Approach

The aim of this study is to analyse the effectiveness of the air change in dwellings with ventilation concepts using passive air transfer elements. Besides an evaluation of the state of knowledge with a literature review the analysis is carried out by means of measurements and simulations. The objective is to address the possibilities and limits of such concepts.

The measurements of the ventilation effectiveness (CO<sub>2</sub> as Indicator) are carried out in two different setups. In two flats of a realised object (renovated building) measurements are carried out during normal use by the residents. Alongside measurements in an occupied test flat are performed to investigate different types of passive air transfer elements. This enables to obtain results in an environment with real occupancy but partially controlled measurement conditions. Besides the measurements different scenarios are analysed with two CFD simulation models. The aim of the simulation is to find the important parameters influencing the ventilation efficiency and the limits of such concepts. To validate the simulations model and to examine individual parameters, measurements are carried out in a laboratory environment comparable to the simulation (research apartment "ROTEG" of the laboratory of the Rosenheim Technical University of Applied Sciences).

## Main results

The following main results can be drawn from the study:

- In dwellings with open interior doors, there is a rapid equalisation of CO<sub>2</sub> concentrations between the different rooms. Figure 7 shows the results of three rooms in the two analysed flats. The bar chart shows the frequency distribution of the CO<sub>2</sub> concentrations in the bedrooms occupied at night for different situations.
- The measurements show that the residents often keep the interior doors closed, especially at night. As a result, the exchange of air via open doors no longer works. This can be seen in Figure 7, especially in the results for flat 2.

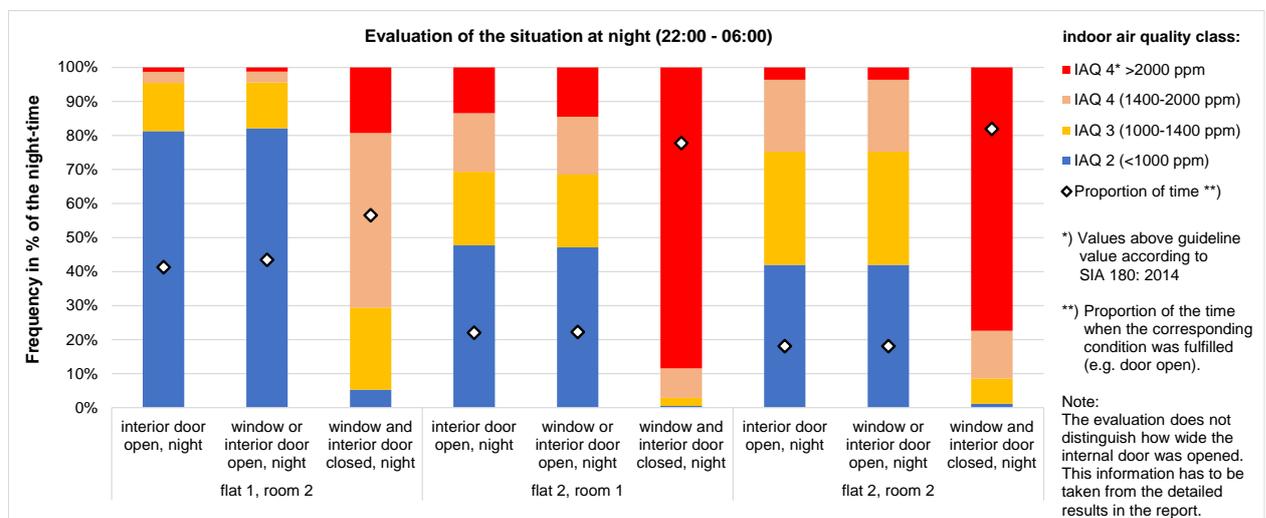


Figure 7: Frequency distribution of CO<sub>2</sub> concentration in % of the night-time (22:00-6:00); evaluation of different situations / cases

- Already slightly opened doors can have a considerable effect on the air exchange. Especially interior doors with an opening width (gap) of 10 cm or more, show already an effective air exchange between room and corridor and can break the peaks of the CO<sub>2</sub> concentrations inside the room. Figure 8 shows the results from the measurements in the test flat.
- To achieve a satisfactory air exchange with closed interior doors a passive air transfer element must have the following characteristics: A large cross-section (free cross-section approximately 0.1 m<sup>2</sup> or more), an arrangement near the floor and ceiling (50% of cross-section each) and a very low pressure drop across the element (in the range of 0.1 Pa). Figure 9 shows the results from the measurements in the test flat with different air transfer elements.

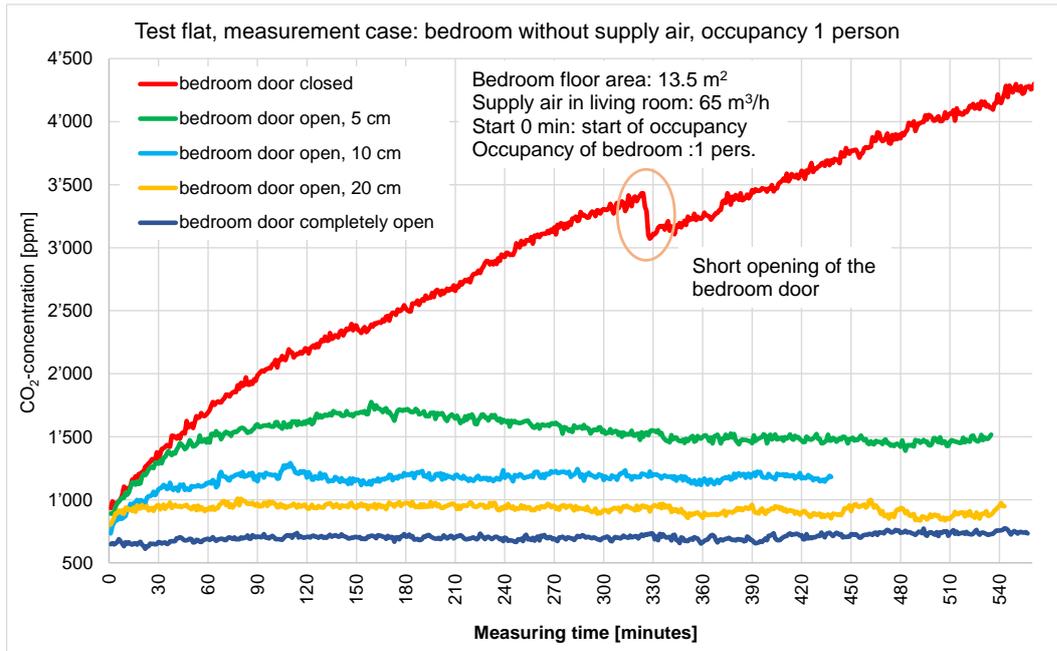


Figure 8: Time variation of CO<sub>2</sub> concentration in bedroom, night period, comparison of different opening width (gap) of interior door

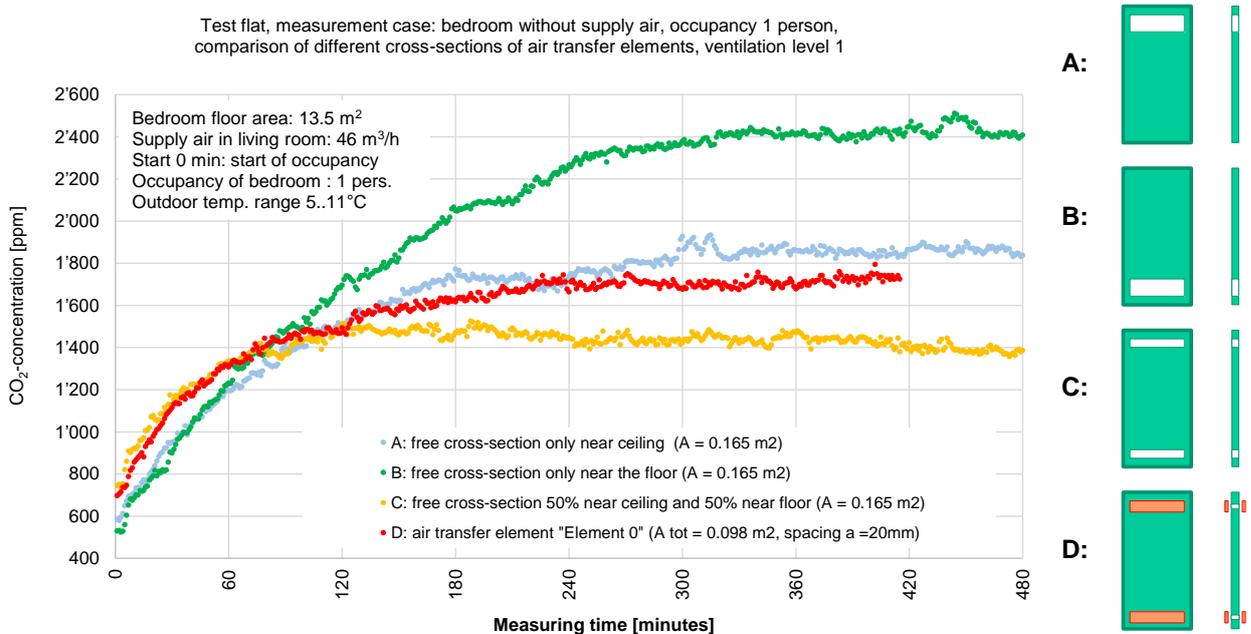


Figure 9: Time variation of CO<sub>2</sub> concentration in bedroom, night period, comparison of different situations for air transfer elements

- Measurements and simulations with a passive air transfer element comparable to those available on the market show that high peaks of CO<sub>2</sub> concentration (well over 2000 ppm) occurring in the early morning in a bedroom with closed windows and doors can be reduced clearly.
- However, the measurements also showed that the effect is strongly dependent on the ambient conditions and works less effective especially at higher outdoor temperatures. In this case the lower temperature differences between the different rooms of the dwelling reduce the thermal induced pressure difference and therefore the air exchange.
- All measurements were carried out with CO<sub>2</sub> as indicator gas for air quality. Qualitative results from the measurements in the test flat indicate that odours are not removed equally efficiently. During measurements of decay curves from CO<sub>2</sub> concentrations of 2100 down to 600 ppm throughout the daytime without occupancy, odour emissions were still clearly perceived afterwards. However, these effects could not be investigated in detail within the scope of this project.
- The comparison between the measurements in real dwellings and the measurements in the laboratory environment with dummies respectively the CFD simulation, show considerable differences. This made the interpretation and the transfer of the results from laboratory situations to real situations in the occupied building difficult.

### **Outlook**

The analysed cases show the limitations and disadvantages of air exchange through interior doors or passive air transfer element. However, the analysis also shows that the air exchange through such elements is quite effective to prevent high CO<sub>2</sub> concentrations under appropriate conditions. In the case of a simple interior room door, the influence of the user behaviour is decisive. The results can be used for the further development of passive air transfer elements and support the implementation of concepts with simplified air ducting within the dwelling.

The most important findings can be used as information for planners and building owners in Minergie events and training courses. It will also be relevant for the future requirements for ventilation concepts of Minergie and can be used for further development of such concepts.

For further development of the investigated concept, it would be favourable to verify the results of the study in a real, inhabited building. This way it can be proved with a certain degree of certainty that the passive air transfer element used in the study is also suitable in real-life applications and shows the expected effectiveness. At the same time the possibilities for improvements of such element should be investigated. For this purpose, a comparison with an active air transfer element would be useful.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>16</b>
1.1	Ausgangslage .....	16
1.2	Zielsetzung .....	16
1.3	Vorgehen .....	16
1.3.1	Grundlagen .....	16
1.3.2	Resultate Messtechnische Analysen .....	17
1.3.3	Simulationen .....	17
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>18</b>
2.1	Literaturrecherche .....	18
2.1.1	Kaskadenlüftung (Zuluft einbringung im Schlafzimmer) .....	18
2.1.2	Kaskadenlüftung (Zuluft einbringung nur im Wohnzimmer, aktive Überströmer) .....	18
2.1.3	Lüftungseffizienz .....	19
2.1.4	Passive Überströmelemente .....	19
2.1.5	Luftaustausch über geöffnete Türen (ohne aktive Überströmer) .....	20
2.2	Normen, Richtlinien und Standards .....	20
2.3	Lüftungstechnische Grundlagen .....	22
2.3.1	Konzept Verbund .....	22
2.3.2	Thermischer Antrieb der Luft .....	23
2.4	Luftaustausch über Türöffnungen .....	23
2.4.1	Herstellerspezifische Informationen .....	24
2.4.2	Abschätzungen von Einflussfaktoren mit vereinfachtem Modell .....	24
<b>3</b>	<b>Resultate Messtechnische Analysen</b> .....	<b>27</b>
3.1	Messungen in Testwohnung .....	27
3.1.1	Basis und Randbedingungen der Testmessungen .....	27
3.1.2	Resultate zum Einfluss der Türöffnung .....	28
3.1.3	Resultate zum Einfluss des freien Querschnittes des Überströmelementes .....	32
3.1.4	Resultate für ein am Markt erhältlichen Überströmelementes .....	38
3.2	Messungen in realisiertem Gebäude .....	41
3.2.1	Objekt .....	41
3.2.2	Messkonzept .....	42
3.2.3	Übersicht Messresultate Luftmengen und Belegung .....	44
3.2.4	Messresultate und Erkenntnisse Wohnung 1 .....	45
3.2.5	Messresultate und Erkenntnisse Wohnung 2 .....	54
3.3	Messungen in «ROTEG» Forschungswohnung .....	64

3.3.1	Forschungswohnung.....	64
3.3.2	Messkonzept.....	64
3.3.3	Messresultate und Erkenntnisse.....	65
<b>4</b>	<b>Resultate Simulationen .....</b>	<b>67</b>
4.1	Raummodell.....	67
4.1.1	Abgleich Messaufbau ROTEG-Forschungswohnung mit «Design» der Simulationen.....	68
4.2	Randbedingungen.....	68
4.3	Szenarien.....	69
4.4	Resultate der Szenarien.....	69
4.4.1	Validierung der Simulationsmodelle.....	69
4.4.2	Resultate der Simulationsvarianten .....	72
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>77</b>
5.1	Diskussion.....	78
5.2	Ausblick.....	78
<b>6</b>	<b>Bibliographie .....</b>	<b>79</b>
6.1	Abbildungsverzeichnis .....	79
6.2	Tabellenverzeichnis .....	82
6.3	Literaturverzeichnis .....	83
<b>7</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>84</b>
7.1	Messungen in ROTEG Forschungswohnung .....	84
7.2	Messungen in Testwohnung .....	85
7.3	Messungen im realisierten Gebäude .....	88
7.3.1	Messmittel .....	88
7.3.2	Resultate Wohnung 1.....	90
7.3.3	Resultate Wohnung 2.....	94
7.4	CFD-Simulation.....	100
7.4.1	Vergleich Resultate der 1. Modellversion .....	100
7.4.2	Vergleich Resultate der 1. Modellversion .....	101
7.4.3	Resultatdokumentation CFD-Berechnungen .....	103

## Abkürzungsverzeichnis

EBF	Energiebezugsfläche
EFH	Einfamilienhaus
EN	Europäische Norm
EnDK	Konferenz Kantonaler Energiedirektoren
MFH	Mehrfamilienhaus
MuKE	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
RAL	Raumluftklasse
ROTEG	Rosenheimer Technologiezentrum Energie & Gebäude
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SZ	Schlafzimmer
ÜLM	Überströmluftmenge
WRG	Wärmerückgewinnung

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Um eine Lüftungsanlage auch bei beschränkten Platzverhältnissen bei Altbauanierungen ohne hohe Aufwendungen für die Installationen und den damit verbundenen Kosten realisieren zu können, werden Anlagenkonzepte mit stark vereinfachter Luftführung diskutiert und auch realisiert. Seit 2019 lässt Minergie bei Modernisierungen Lüftungskonzepte zu, bei welchen der Luftaustausch über offene Türen aus einem gemeinsamen Korridor bzw. Wohnbereich mit Zuluftversorgung erfolgt. Für Konzepte mit Kaskadenlüftung oder aktiven Überströmelementen liegen bereits Untersuchungen zur Funktion und Wirksamkeit vor, jedoch fehlen entsprechende Analysen und Studien für passive Low-Tech Luftverteilkonzepte.

## 1.2 Zielsetzung

Mit Hilfe vereinfachter Lüftungskonzepte soll erreicht werden, dass auch bei Modernisierungen vermehrt Lüftungssysteme mit Wärmerückgewinnung eingesetzt werden. Dadurch werden neben der Energieeinsparung auch Bauschäden vorgebeugt und der Wohnkomfort erhöht. Mit einfachen Luftverteilkonzepten kann zusätzlich der Aufwand an Grauer Energie für die Luftverteilung reduziert werden. Andererseits sind derzeit keine belastbaren Untersuchungen zur Wirksamkeit und Grenzen solcher Konzepte vorhanden. Dies ist jedoch ein wesentlicher Aspekt in der Planung und soll mit dem vorgeschlagenen Projekt aufgearbeitet werden.

Ziel der Arbeit ist die Aufarbeitung des aktuellen Wissenstandes. Darauf baut die Analyse von neuen Luftführungskonzepten mit minimalem Aufwand für die Luftverteilung auf. Aus den Erkenntnissen sollen Empfehlungen für die Planung solche Systeme erarbeitet werden können.

## 1.3 Vorgehen

Aus den durchgeführten Abklärungen zu den Möglichkeiten und Grenzen der Simulationen ist es aus heutiger Sicht zielführender, die Simulationen im Nachgang zu Messungen mit möglichst kontrollierten Bedingungen durchzuführen, um die Messresultate zur Validierung und Kalibrierung des CFD-Modells nutzen zu können. Basierend auf dieser Vorgehensweise werden im Folgenden die wesentlichen Punkte zum Vorgehen erläutert.

### 1.3.1 Grundlagen

Beginnend werden die Grundlagen erfasst und dargestellt, dazu wird eine Literaturrecherche durchgeführt. Vorhandene Normen, Richtlinien und Standards werden gesichtet und die Lüftungstechnischen Grundlagen erläutert.

Der Fokus der Literaturrecherche liegt auf verschiedenen Varianten der Kaskadenlüftung für Wohnungen. Beispielsweise durch das Einbringen der Zuluft direkt im Schlafzimmer oder nur im Wohnzimmer bzw. Korridorbereich mit aktiven Überströmern für den Luftaustausch mit den Schlafzimmern. Weiterhin wird die Literatur hinsichtlich Lüftungseffizienz und den möglichen Varianten von Überströmelementen gesichtet. Zuletzt werden Systeme für den Luftaustausch über geöffnete Türen ohne aktive Überströmer vorgestellt. Bei den Lüftungstechnischen Grundlagen steht das Konzept Verbund und das Prinzip des thermischen Antriebs im Vordergrund.

### 1.3.2 Resultate Messtechnische Analysen

Testmessungen: Zur Abschätzung für die zu erwartenden Ergebnisse werden Testmessungen in einer Wohnung mit kontrollierter Wohnungslüftung (Einzelwohnungsgerät) vorgenommen. Daraus können erste Erkenntnisse für die Durchführung der Messungen am realisierten Gebäude und die nachfolgenden CFD-Simulationen gewonnen werden.

Messungen in realisiertem Gebäude: Nach den Testmessungen folgen die Messungen der Lüftungswirksamkeit (CO<sub>2</sub>) in 2 Wohnungen mit verschiedenen Grundrissen in einer realisierten Wohnsiedlung.

Messungen in «ROTEG» Forschungswohnung: Da sich Messungen aus real genutzten Wohnungen nur schwer (bzw. gar nicht) für eine Validierung des Modells eignen (aufgrund der vielen variablen Parametern), wären dafür Resultate aus einer «kontrollierten» Umgebung vorzuziehen. Dafür geeignet ist die Musterwohnung der TH Rosenheim (ROTEG; Rosenheimer Technologiezentrum Energie & Gebäude). In dieser Laborumgebung wurden auch verschiedene Untersuchungen mit aktiver Überströmung durchgeführt und auch gewisse Messungen für Situationen ohne aktive Überströmung sind am Laufen. Im Rahmen einer Projektarbeit an der TH Rosenheim wurden in der Forschungswohnung Messungen mit verschiedener Türöffnung und 2 «Personen» durchgeführt.

### 1.3.3 Simulationen

Dank der vorangegangenen Messungen kann nun ein CFD-Simulationsmodell entstehen, dass verschiedene Szenarien zur Beantwortung der offenen Fragen vor allem bezüglich Lüftungswirksamkeit und den Grenzen der Konzepte analysiert. Es müssen die Randbedingungen für das Raummodell festgelegt werden, ob beispielsweise die Türe geöffnet oder geschlossen ist.

Zum Schluss soll eine Dokumentation der Analysen und Resultate in Form eines Schlussberichts erfolgen. Die Erkenntnisse sollen in Form von Empfehlungen in Schulungen weitervermittelt werden.

## 2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel des Berichtes werde die Grundlagen für dieses Projekt zusammengetragen. Zu Beginn wird auf die Literaturrecherche eingegangen. Es werden wesentliche Berichte und Studien kurz erwähnt und ihre Relevanz/Bezug bezogen auf das Projekt aufgezeigt. Anschliessend werden die Normen, Richtlinien und Standards vorgestellt, welche einerseits das Projekt betreffen und andererseits als Grundlage für die Konzeption des Lüftungskonzeptes relevant sind. Im Anschluss daran werden noch die lüftungstechnischen Grundlagen erläutert.

### 2.1 Literaturrecherche

In der Literaturrecherche dieser Arbeit werden wesentliche Studien, Berichte, Literatur und Erkenntnisse zusammengetragen, welche für das untersuchte Luftverteilkonzept von Relevanz sind. Insbesondere wesentliche Studien zu den folgenden Schwerpunkten werden nachfolgend kurz erörtert:

- Kaskadenlüftung mit Zuluft einbringung im Schlafzimmer
- Kaskadenlüftung mit Zuluft einbringung im Wohnzimmer/Gang mit aktiven Überströmern
- Lüftungseffizienz (Grundlegende Untersuchungen zur Messung/Berechnung)
- Überströmelemente (Stand der Abklärungen)
- Luftaustausch über geöffnete Türen (ohne aktive Überströmer)

#### 2.1.1 Kaskadenlüftung (Zuluft einbringung im Schlafzimmer)

Unter einer Kaskadenlüftung versteht man eine kontrollierte Wohnraumlüftung, bei der nicht jeder einzelne Raum separat be- oder entlüftet wird; es werden mehrere Räume hintereinander durchströmt. Dadurch wird weniger Strom für die Ventilatoren gebraucht, auch kann dadurch der Geräuschpegel eben dieser gesenkt werden. Weitere Vorteile können entsprechender Fachliteratur entnommen werden. In dem ersten, untersuchten Fall wird die Zuluft nur im Schlafzimmer eingebracht. Abgesaugt wird die Abluft in den Nassräumen, also dem Bad und aus der Küche.

Aus der Literaturrecherche geht hervor, dass bei einer Kaskadenlüftung mit einer reinen Zuluft einbringung im Schlafzimmer, die Durchmischung der Luft in Wohn- und Essbereichen selbst bei ungünstiger Raumanordnung ausreichend gewährleistet ist. Dies haben verschiedenen CFD-Simulationen, bzw. Messungen gezeigt (Barp, et al., 2009).

Eine weitere Untersuchung von Systemen mit erweiterter Kaskadenlüftung ohne Zuluft im Wohnzimmer (Kaskade: Schlafzimmer-Wohnzimmer-Abluft) hat ergeben, dass beispielsweise die Öffnungen für Zu- und Abluftüberströmung nicht beide unten oder nicht auf gleicher Höhe realisiert werden sollten. Auch diese Ergebnisse sind mithilfe von Simulationen und Messungen entstanden (Pfluger, et al., 2013).

Beide Quellen liefern jedoch keine Aussagen hinsichtlich der Luftqualität in den Räumen für Lüftungssysteme ohne Zuluft einbringung in den Schlafzimmern.

Weitere Literatur, die Kaskadenlüftung mit Zuluft einbringung im Schlafzimmer vergleicht, führt zu ähnlichen Erkenntnissen (Sibille, 2015) (Rojas, et al., 2015).

#### 2.1.2 Kaskadenlüftung (Zuluft einbringung nur im Wohnzimmer, aktive Überströmer)

In einer Untersuchung von diversen Systemen mit vereinfachter Luftführung, unter anderem Systeme ohne Zuluft in den Schlafzimmern (Luftaustausch mittels aktiver Überströmer), werden die wesentlichen Resultate zu den Anordnungen festgehalten, beispielsweise wie die Überströmer und Luftauslässe platziert werden müssen, damit keine Kurzschlussströmungen entstehen. Die entsprechenden Empfehlungen konnten durch CFD-Simulationen und Messungen belegt werden (Sibille, et al., 2015).

Bei Kaskadenlüftung mit aktiven Überströmern kann der gleiche thermische Komfort wie bei der traditionellen Lösung erreicht werden, jedoch ist der Stromverbrauch etwas höher. Mithilfe von dynamischen Simulationen konnte die technische Machbarkeit nachgewiesen werden. (Sibille, et al., 2017)

Die Vor- und Nachteile von aktiven Überströmern können wie folgt zusammengefasst werden: Gut geeignet sind Überströmer vor allem für Sanierungen, da keine Kanäle benötigt werden und dadurch Reinigungs- und Investitionskosten gemindert werden können. Auch kann eine Regelung der einzelnen Räume dadurch implementiert werden. Nachteilhaft ist die Lärmbelastung, die durch die Überströmer entsteht und die erhöhten Kosten im Betrieb (Strobel, et al., 2019).

Auch gibt es Literatur zur messtechnischen Untersuchung eines Wohngebäudes (EFH) mit aktiven Überströmern. Die Raumluftqualität in den Räumen des Hauses entspricht den Empfehlungen der SIA Normen. (Keller, et al., 2016)

Die Literatur liefert auch hier keine Aussagen hinsichtlich der Luftqualität in den Räumen für Lüftungssysteme ohne kontrollierte Zuluftbringung in den Schlafzimmern (beispielsweise ohne aktive Überströmer oder ohne Luftauslässe).

### 2.1.3 Lüftungseffizienz

Verschiedene Literaturquellen behandeln die anzuwendende Methodik (z.B. bei Messungen) und die Unterschiede zwischen verschiedenen Arten der Lufteinbringung, beziehungsweise die lokalen Unterschiede der Lüftungseffizienz. Diese sind daher aus generellerer Sicht von Interesse für die Untersuchung.

Messungen in zwei natürlich belüfteten Wohnungen zeigen, dass, wenn die Luft zwischen den Räumen einer Wohnung gut zirkulieren soll, die Positionen der Innentüren einen enormen Einfluss auf die Effizienz des Luftaustausches haben. Die Effizienz des Luftaustausches (lokale Luftwechselrate) im Schlafzimmer mit geschlossener Tür war im Vergleich zur Messung mit offenen Türen um 43% niedriger. Bei offenen Schlafzimmertüren wurde bezüglich Lüftungseffizienz eine vergleichbare Situation wie bei einer Mischlüftung beobachtet (Mikola, et al., 2019).

In einer weiteren Untersuchung werden verschiedene Methoden zur Ermittlung der Lüftungseffizienz analysiert und verglichen. (Remion, et al., 2018)

Weitere Literatur über verschiedene Systeme der Lufteinbringung die generell untersucht und verglichen werden, wird gesichtet. Diese Untersuchungen sind generellerer Art und legen den Fokus nicht auf Wohngebäude, können aber für gewisse Fragestellungen in der Arbeit von Interesse sein (Yang, et al., 2019).

### 2.1.4 Passive Überströmelemente

Handelsübliche Überströmelemente sind für höhere Druckverluste ausgelegt, sodass in den recherchierten Herstellerunterlagen üblicherweise die Angaben zu den erreichbaren Luftmengen sich auf eine Druckdifferenz von min. 10 [Pa] bzw. in einigen Fällen 5 [Pa] beziehen.

Da für den vorgesehenen Einsatz ein sehr tiefer Druckverlust erforderlich ist (deutlich unter 1 [Pa]), ist fraglich, inwieweit die verfügbaren Angaben extrapoliert werden können (Umschlag von turbulenter auf laminare Strömung). Aus diesem Grund ergab die Literaturrecherche bezüglich den Überströmelementen kein konkret verwendbares Resultat.

Auf Basis des Projektes «Doppelnutzen» (Pfluger, et al., 2013) wurden verschiedene Kennwerte aus den Messergebnissen in einem Online-Planungsleitfaden zusammengestellt und publiziert: <https://phi-ibk.at/luftfuehrung/>.

Auf Basis dieser empirischen Formeln soll in einem weiteren Schritt der Druckverlust verschiedener Elemente grob abgeschätzt werden und so eine gewisse Einschätzung des zu erwartenden Luftaustausches erfolgen.

### 2.1.5 Luftaustausch über geöffnete Türen (ohne aktive Überströmer)

Zu Systemen mit einem passiven Luftaustausch über geöffnete Türen (ohne aktive Überströmer), wie im Projekt zu untersuchen, konnten keine publizierten Untersuchungen gefunden werden. Gewisse Teilaspekte dieses Systems wurden im Projekt «Doppelnutzen» (Pfluger, et al., 2013) untersucht.

Aus zwei nicht publizierten Quellen sind Anhaltspunkte zum Verhalten des Luftaustausches bei verschiedenen Türöffnungsgraden ohne aktive Komponenten vorhanden.

Diese können in der weiteren Projektbearbeitung zum Vergleich der Resultate dienen. Insbesondere über die noch laufenden Arbeiten von Thomas Strobel (Dissertation TH Rosenheim, in Arbeit) wird versucht, eine Abstimmung oder wenn möglich Zusammenarbeit zu erzielen.

## 2.2 Normen, Richtlinien und Standards

Für die Analyse und Beurteilung vereinfachter Lüftungskonzepte sind folgende Normen und Richtlinien von Bedeutung:

- SIA 180: 2014; «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden»
- SIA 382/1: 2014; «Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen»
- SIA-Merkblatt 2023 «Lüftung in Wohnbauten» (SIA 2023, 2008)<sup>1</sup>
- SIA 382/5 «Lüftung in Wohnbauten» (SIA 382/5, 2021)

Im Folgenden werden für das Projekt relevante Inhalte diese Dokumente kurz zusammengefasst.

### ***SIA 180: 2014 «Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden»***

Die Norm SIA 180 (SIA 180, 2014) bildet die schweizerische Grundlagennorm zur Sicherstellung eines behaglichen Raumklimas und Vermeidung von Bauschäden. Diese Norm ist damit auch für Gebäude gültig, die nicht über eine mechanische Lüftungsanlage verfügen. In Kapitel 3.1 werden die grundlegenden Anforderungen an die Raumluftqualität festgelegt und in Kapitel 3.2 die Anforderungen und das Vorgehen für das Lüftungskonzept definiert.

SIA 180 verweist für mechanisch belüftete Gebäude auf die Norm (SIA 382/1, 2014). Für die übrigen Gebäude (z.B. mit reiner Fensterlüftung) wird für die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Aufenthaltsbereich ein Richtwert von 1000-2000 ppm gefordert (SIA 180; Tabelle 4)

---

<sup>1</sup> Die SIA 2023 wurde im Mai 2021 abgelöst durch die Norm SIA 382/5: 2021

### **SIA 382/1: 2014 «Lüftungs- und Klimaanlage – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen»**

Die Norm SIA 382/1 gilt als allgemeine Norm für Lüftungsanlagen in personenbelegten Räumen und ist daher den übrigen schweizerischen Lüftungsnormen und -richtlinien übergeordnet.

In Kapitel 2.2.6 werden die grundlegenden Anforderungen an die Raumluftqualität festgelegt und in Kapitel 4.2 die Grundsätze und Anforderungen an die Lüftung definiert (inkl. Fensterlüftung). In Kapitel 5.3.4 und 5.3.5 sind zudem grundsätzliche Auslegungsrichtlinien für Zu- und Abluftvolumenströme festgelegt.

Die für die Anforderungen an die Raumluftqualität massgebenden RAL-Klassen werden in SIA 382/1: 2014 in Tabelle 8 (Kap. 1.7.2) aufgeführt.

Tabelle 1: Klassierung der Raumluftqualität RAL (Quelle: SIA 382/1: 2014)

Kateg.	Beschreibung	Beispiele
RAL 1	Raumluft mit hoher Luftqualität Luft in Räumen mit besonderen Anforderungen an den Gehalt von Fremd- und Geruchsstoffen in der Raumluft	Labor- und Produktionsräume für empfindliche Arbeiten bzw. Güter
RAL 2	Raumluft mit mittlerer Luftqualität Luft in Räumen, die dem Aufenthalt von Personen dienen und bei denen erhöhte Ansprüche gestellt werden; CO <sub>2</sub> -Pegel < 1000 ppm*, Lüftrate > 30 m <sup>3</sup> /h-Person	Räume mit speziellen Ansprüchen an Gerüche, insbesondere für neu ein-tretende Personen
RAL 3	Raumluft mit mässiger Luftqualität Luft in Räumen, die dem Aufenthalt von Personen dienen; CO <sub>2</sub> -Pegel 1000 bis 1400 ppm*, Lüftrate 18 bis 30 m <sup>3</sup> /h-Person	Typische Wohn- und Büroräume
RAL 4	Raumluft mit niedriger Luftqualität Luft in Räumen, in denen sich nur selten oder keine Personen aufhalten, sowie Luft in Räumen, in denen geraucht wird	Lagerräume, Korridore; alle Räume, in denen geraucht wird

\*) Die angegebenen CO<sub>2</sub> Pegel gelten für einen CO<sub>2</sub> -Gehalt der Aussenluft von 400 ppm und eine CO<sub>2</sub> -Emission pro Person von 18 l/h

### **SIA-Merkblatt 2023: 2008 «Lüftung in Wohnbauten» (gültig bis Mai 2021)**

Im Gegensatz zur allgemeinen Norm SIA 382/1 geht das SIA-Merkblatt 2023<sup>2</sup> vollständig auf die Wohnungslüftung ein und ist daher massgebend für deren Dimensionierung. Es werden beide Lüftungsmethoden (natürliche und mechanische Lüftung) beschrieben. Für die Lüftungssysteme werden in diesem Merkblatt auch numerische Dimensionierungs- und Planungsvorgaben gegeben. Dabei werden in den Dimensionierungsgrössen der Luftmengen auch Unterschiede in den Typen der Luftverteilung gemacht (geringere Gesamtluftmengen für Konzepte mit Durchströmbereichen).

### **SIA 382/5:2021 «Lüftung in Wohnbauten»**

Die Norm SIA 382/5 (SIA 382/5, 2021) ersetzte im Mai 2021 das SIA-Merkblatt 2023. Im Vergleich zum SIA-Merkblatt 2023 sind bezüglich der untersuchten Systeme insbesondere die folgenden Neuerungen relevant:

- Die Anforderungen an die Raumluftqualität sind klarer formuliert, sprich, es werden spezifische CO<sub>2</sub>-Pegel für die verschiedenen Anforderungen genannt (RAL-Klassen gemäss SIA 382/1: 2014).
- Die SIA 382/5 erlaubt in vielen Fällen eine Dimensionierung auf tiefere Luftvolumenströme.
- Neben der Kaskadenlüftung wird auch der Begriff der Verbundlüftung eingeführt.
- Im Normentwurf wird im Kapitel «Kaskadenlüftung» zudem definiert, dass die Luftführung sowohl bei offenen wie auch bei geschlossenen Zimmertüren gleich funktionieren muss. Zudem dürfen die Luftvolumenströme durch die Stellung der wohnungsinternen Türen nicht wesentlich beeinflusst werden.

Im Zusammenhang mit dem in Kraft treten der SIA 382/5 stellt sich daher die Frage, wie eine «passive Verbundlüftung» zukünftig gemäss dieser Norm zu beurteilen bzw. zu planen wäre.

<sup>2</sup> Im Schweizerischen Regelwerk hat ein SIA-Merkblatt den Stellenwert einer Vornorm.

## 2.3 Lüftungstechnische Grundlagen

### 2.3.1 Konzept Verbund

Die Zuluft wird im offenen Bereich der Wohnung, an den die Zimmer angrenzen, zugeführt. Dieser Bereich umfasst in der Regel den Korridor und den Wohnbereich. Die gesamte Zuluft der Wohnung kann nur durch einen einzigen oder auch durch mehrere Zuluft-Durchlässe einströmen. In Bad, Dusche, WC und Küche wird die Abluft abgeführt.

Die Zimmer liegen im sogenannten Verbundbereich. Stehen die Türen offen, sorgt die natürliche Luftbewegung hier für ausreichende Umwälzung. Jedoch ist ein solches Lüftungssystem stark abhängig von den Lasten und der Durchlassdimension (Tür offen oder geschlossen). Auch die thermische Situation spielt eine tragende Rolle, dies wird allerdings im Folgenden noch genauer eruiert.

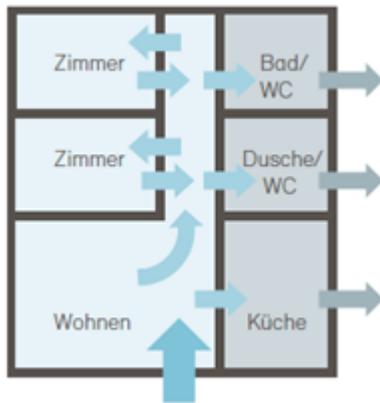


Abbildung 10: Beispiel: Strömung bei einem Lüftungsverbund-Konzept

Gemäss (FprSIA 382/5, 2019) müssen sogenannte Verbundlüfter oder aktive Überströmer eingesetzt werden. Sie sorgen bei geschlossenen Türen für den Luftaustausch zwischen Zuluftbereich und Verbundbereich. Der Minergie-Standard lässt aber mittlerweile bei Sanierungen und Modernisierungen zu, dass keine aktiven Überströmer eingebaut werden müssen, sondern der Luftaustausch über geöffnete Türen erfolgen soll.

Bei Verbundlüftungen können unangenehme Gerüche aus dem Ess- oder Kochbereich in die Zimmer gelangen. Dies kann vermieden werden, wenn sich die Verbundlüfter bei Bedarf ausschalten lassen.

Die Zu- und Abluft-Volumenströme sind in der gesamten Wohnung gleich gross. Das Prinzip Verbund zeichnet sich durch kurze Zuluft-Leitungen aus, da keine Lüftungskanäle für die einzelnen Räume benötigt werden.

Das in diesem Projekt untersuchte System unterscheidet sich nur insoweit von einer Verbundlüftung, dass keine aktiven Elemente verwendet werden, sondern von einem passiven Austausch der Luft über die Türöffnung ausgegangen wird. Die Antriebskraft dafür ist in erster Linie der thermische Antrieb, der zu einem Luftaustausch über das Türelement führt.

### 2.3.2 Thermischer Antrieb der Luft

Ein Austausch der Luft im Raum kann durch mehrere Möglichkeiten ermöglicht sein. Zum einen kann eine mechanische Lüftung die Luftströmung antreiben und mit Zu- und Abluftauslässe die Luftmenge gezielt steuern. Zum anderen können die Fenster geöffnet werden. So wird die Luft auch ausgetauscht, jedoch kann der Luftstrom nicht gesteuert werden. Der Luftaustausch kann durch unterschiedliche Drücke und damit zusammenhängende Temperaturen beeinflusst werden. Mischt man beispielsweise warme und kalte Luft, so wird diese sich thermodynamisch bedingt aneinander angleichen und somit die warme Luft zur kalten Luft strömen. Auch mit maschineller Lüftung kann je nach Wunsch ein Unter- oder Überdruck erzeugt werden, damit eine gewisse Strömung entsteht.

In der Untersuchung für das Bundesamt für Energie werden Wohnungen ausgewählt, bei denen eine gezielte Luftströmung durch die Wohnung erzeugt wird, mit der Luftauslässe in Wohn- und Schlafzimmer überflüssig werden (siehe Kaskadenlüftung (Zuluft einbringung im Schlafzimmer)).

## 2.4 Luftaustausch über Türöffnungen

Da aus Gewohnheit, Lärmschutzgründen oder beispielsweise einem Haustier in den meisten Fällen die Schlafzimmertür nachts geschlossen wird, kann zu dieser Zeit weniger bis fast kein Austausch der Luft aus den anderen Räumen bei dem zuvor beschriebenen Verbund-System kommen. Daher stellt sich die Frage, ob ein ausreichender Luftaustausch für das entsprechende Zimmer über einen Schlitz oder eine Öffnung in der Tür möglich ist, damit die CO<sub>2</sub>-Konzentration über Nacht nicht zu sehr ansteigen kann.

Es stellt sich generell die Frage, inwiefern der freie Querschnitt einen Einfluss auf die Konzentration hat:

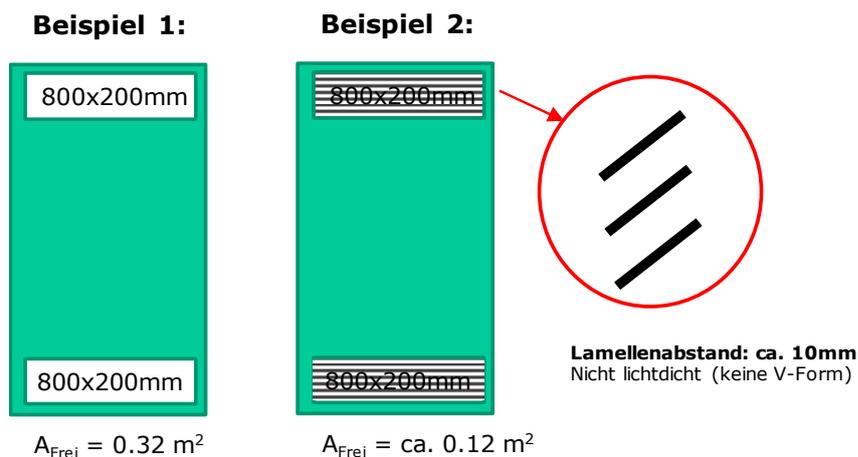


Abbildung 11: Beispiele für Querschnitte

Bei Elementen mit Lichtschutz oder Schalldämmung sind die Druckverluste hoch, was dem Ziel, eine akzeptable Luftqualität ohne aktives Element für den Luftaustausch über die Türen, entgegenwirkt. Um den Ansprüchen einer ausreichenden Frischluftzufuhr gerecht zu werden müssten die erforderlichen freien Querschnitte entsprechend dimensioniert werden, was zu grossen Elementen führen würde.

### 2.4.1 Herstellerspezifische Informationen

Im Handel sind verschiedene Variationen von entsprechenden Elementen bereits erhältlich. Für das Projekt wurden einige Elemente bezüglich ihres Druckverlustes ausgewertet, um Hinweise auf die zu erwartende Eignung als Überströmelement zu erhalten. Nachfolgend werden die einzelnen Produkte gegenübergestellt und bewertet.

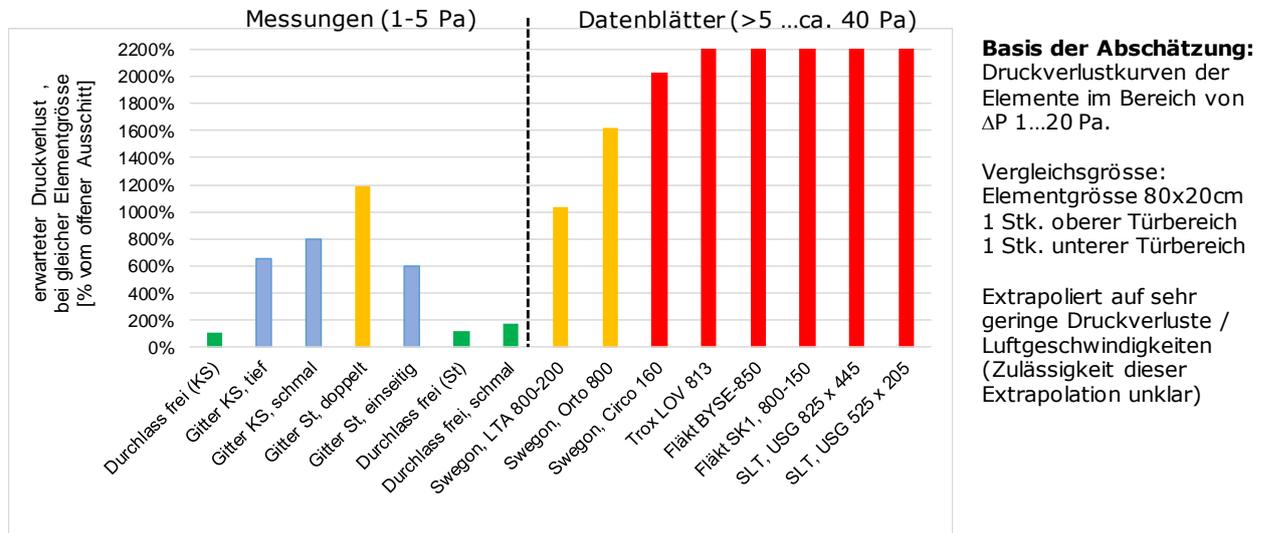


Abbildung 12: Analyse möglicher Einbauelemente

### 2.4.2 Abschätzungen von Einflussfaktoren mit vereinfachtem Modell

Für eine Abschätzung des zu erwartenden Einflusses wichtiger Parameter wurden Berechnungen mit einem stark vereinfachten Modell durchgeführt. Das Modell basiert auf einer idealen Durchmischung im Raum und berücksichtigt keine Einflüsse aus Strömungen und Lasten. In der Modellberechnung wird die Überströmluftmenge über die gesamte Berechnungsperiode als konstant angenommen (in Realität nicht konstant!!). Für folgende Fälle wurde der Einfluss betrachtet:

- Einfluss der Personenzahl (1 bzw. 2 Personen mit je 0.7 met, bzw. 12 l/h CO<sub>2</sub>)
- Einfluss der zentral (im Korridorbereich) eingeblasenen Aussenluftmenge (60 m<sup>3</sup>/h und 90 m<sup>3</sup>/h)
- Einfluss der Überströmluftmenge (50 m<sup>3</sup>/h und 25 m<sup>3</sup>/h) zwischen Schlafzimmer und Korridor

Die übrigen Parameter wie Flächen, Aussenluftkonzentration (450 ppm) wurden konstant belassen bzw. nicht berücksichtigt. Die Berechnung basiert auf einer Fläche der Wohnung von total 60 m<sup>2</sup> und einer Fläche des Schlafzimmers von 14 m<sup>2</sup> bei einer lichten Raumhöhe von 2.4 m.

Wie aus Abbildung 13 ersichtlich, hat die Personenbelegung einen grossen Einfluss auf die erreichte Gleichgewichtskonzentration. In der Berechnung wurde die Überströmluftmenge für beide Fälle mit 50 m<sup>3</sup>/h angenommen. In der Realität ist bei Belegung mit 2 Personen durch den grösseren thermischen Antrieb mit einer Zunahme der Überströmluftmenge (ÜLM) zu rechnen. In Realität dürfte die zu erwartende Differenz also eher geringer sein.

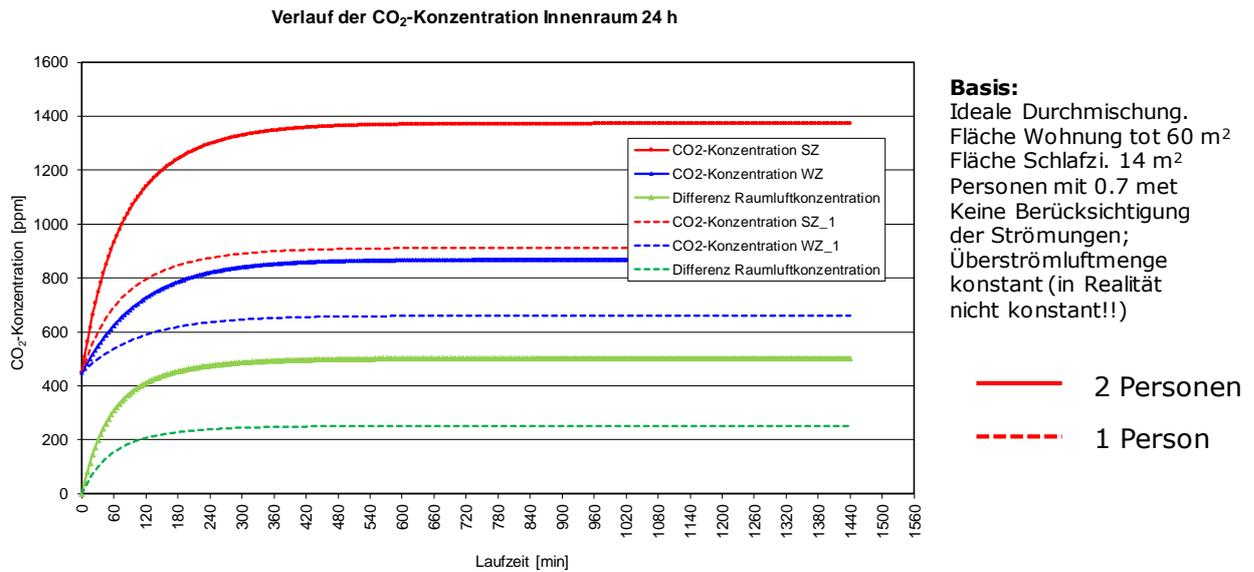


Abbildung 13: Einfluss Personenzahl im vereinfachten Modell

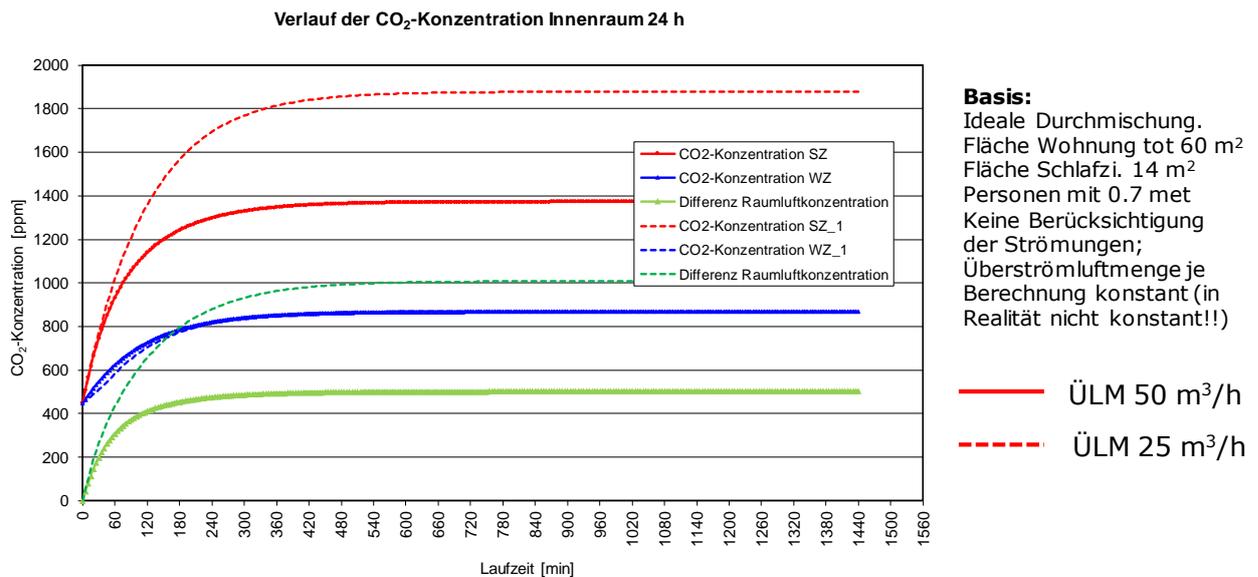


Abbildung 14: Einfluss Überströmflutmenge im vereinfachten Modell

Wird dagegen die Überströmflutmenge bei einer Belegung mit 2 Personen von 50 m<sup>3</sup>/h auf 25 m<sup>3</sup>/h reduziert, wird damit die Differenz der Raumluftkonzentrationen zwischen Schlaf- und Wohnzimmer entsprechend erhöht (im Berechnungsfall verdoppelt). Abbildung 14 zeigt diesen Berechnungsfall.

Bei einer Erhöhung der Aussenluftmenge (im Berechnungsfall von 60 m<sup>3</sup>/h auf 90 m<sup>3</sup>/h) wird die Differenz der Raumluftkonzentrationen zwischen Schlaf- und Wohnzimmer nicht verändert. Nur die absolute Konzentration in den Räumen nimmt durch den höheren Aussenluftumsatz ab. Dieser Fall ist in Abbildung 15 dargestellt.

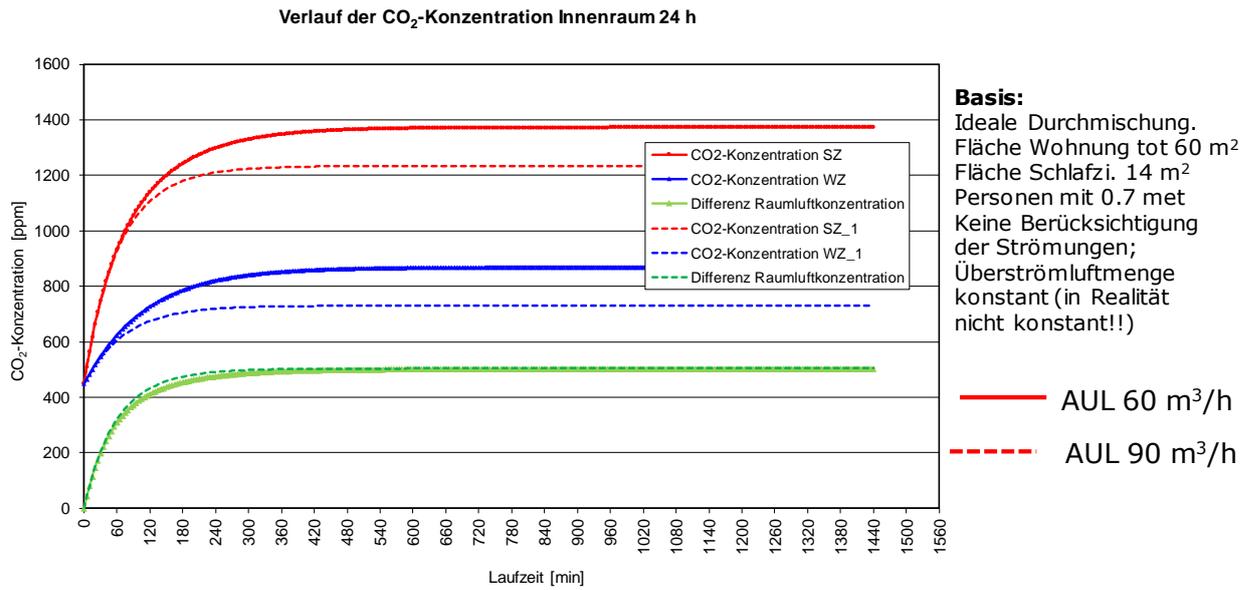


Abbildung 15: Einfluss Aussenluftmenge im vereinfachten Modell

Mit diesem Modell können auch gewisse Phänomene, die sich bei den Kurven in den Messungen in der Testwohnung zeigten, erklärt werden. Wie in Abbildung 16 zu sehen, entsteht bei erhöhten Startkonzentrationen (z.B. durch Belegung der Wohnung am Tag/Abend) der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer mit einem Maximum nach etwa 2-3 Nachtstunden. Ein vergleichbares Verhalten zeigte sich in diversen Messnächten in der Testwohnung.

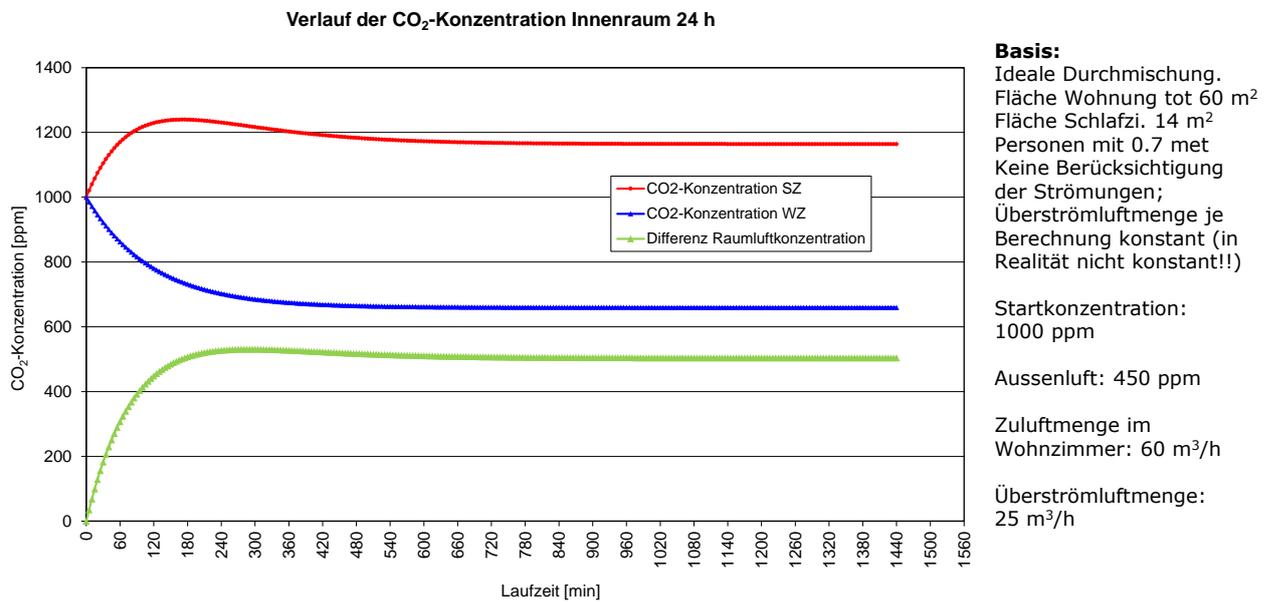


Abbildung 16: Einfluss Startkonzentration im vereinfachten Modell

## 3 Resultate Messtechnische Analysen

### 3.1 Messungen in Testwohnung

Um Anhaltspunkte für den erreichten Luftaustausch für verschiedene Türstellungen und Durchlassquerschnitte zu erhalten, wurden in einer real bewohnten 2½ Zimmer-Wohnung Messungen durchgeführt, bei denen die Bedingungen relativ gut überwacht und protokolliert werden konnten. Das Ziel dieser Messungen war es, Erkenntnisse zum Vergleich zwischen den Messungen in einem bereits mit einem solchen System realisierten und bewohnten Gebäude (siehe Kapitel 3.2), den Messungen mit Dummys unter Laborbedingungen (siehe Kapitel 0), sowie den CFD-Simulationen (siehe Kapitel 4), zu gewinnen.

#### 3.1.1 Basis und Randbedingungen der Testmessungen

Um Abschätzungen für die zu erwartenden Ergebnisse zu erhalten und um einzelne Einflüsse in einer teilweise kontrollierten Umgebung vornehmen zu können, wurden Testmessungen in einer Wohnung mit kontrollierter Wohnungslüftung (Einzelwohnungsgerät) vorgenommen.

Durch die vorhandene Lüftung waren die Standorte der Luftpfeile und Abluftgitter vorgegeben.

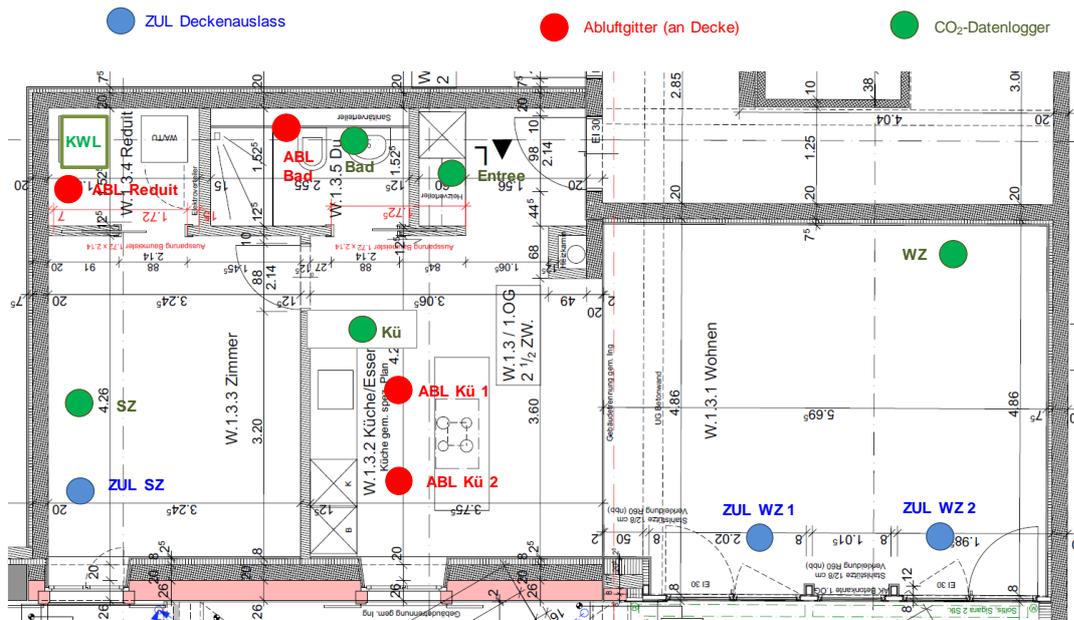


Abbildung 17: Grundriss Wohnung für Testmessungen (System mit KWL-Gerät je Wohnung)

Um ähnliche Verhältnisse wie im zu untersuchenden System zu erhalten, wurden einzelne Luftdurchlässe luftdicht verschlossen, damit das Schlafzimmer nur über die Zuluft vom Wohnzimmer versorgt ist. Die Abluftauslässe in der offenen Küche wurden in einigen Messungen ebenfalls verschlossen, um eine gewisse Durchströmung der Wohnung zu erzwingen. Einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Messung im Schlafzimmer konnte daraus jedoch nicht festgestellt werden.

Die folgenden Randbedingungen waren bei den Messungen vorhanden: Die Wohnung wird durch eine Person belegt und die Fenster wurden innerhalb der einzelnen Auswerteperioden nicht geöffnet. Um eine An- oder Abwesenheit in der Wohnung und den Zimmern festzuhalten, wurde ein Journal für die Datenauswertung geführt. Die Türstellung zum Schlafzimmer wurde festgehalten und so verschiedene «Standardstellungen» über Nacht gemessen. Aufgezeichnet wurden CO<sub>2</sub>-Konzentration, Raumtemperatur und Raumfeuchte an 3 bis 5 verschiedenen Standorten in der Wohnung. Die Lüftungsanlage wird auf eine konstante Lüftungsstufe («Stufe 1») gestellt. Die Luftmengen wurden zu Beginn der Aufzeichnung erfasst und dokumentiert. Zudem wurden die Aussenbedingungen aufgezeichnet. Die nachfolgend ausgewerteten

Perioden beinhalten Aussentemperaturen im Bereich ein Tages-Maximum zwischen 18 und 27 °C und ein Nacht- Minimum von 9 bis 16 °C.

Durch das Verschliessen einzelner Luftdurchlässe bei den Testmessungen ergab sich eine leicht tiefere Gesamtluftmenge für den Testfall wie für den «Referenzfall» mit Normalbetrieb der KWL (Stufe 1 alle Luftdurchlässe offen). Folgende Gesamtluftmengen wurden gemessen:

Der Testmessbetrieb beinhaltet einen Zuluftvolumenstrom von 39 m<sup>3</sup>/h und einen Abluftvolumenstrom von 36 m<sup>3</sup>/h. Der Differenzdruck gegen aussen beträgt circa. +1 Pa (Bereich: +0.5...+1.2 Pa).

Der Referenzbetrieb liefert einen Zuluftvolumenstrom von 47 m<sup>3</sup>/h (davon 19 m<sup>3</sup>/h im SZ) und einen Abluftvolumenstrom von 47 m<sup>3</sup>/h. Der Differenzdruck gegen aussen lag hierbei bei circa 0 Pa (Bereich: - 0.5...+0.5 Pa).

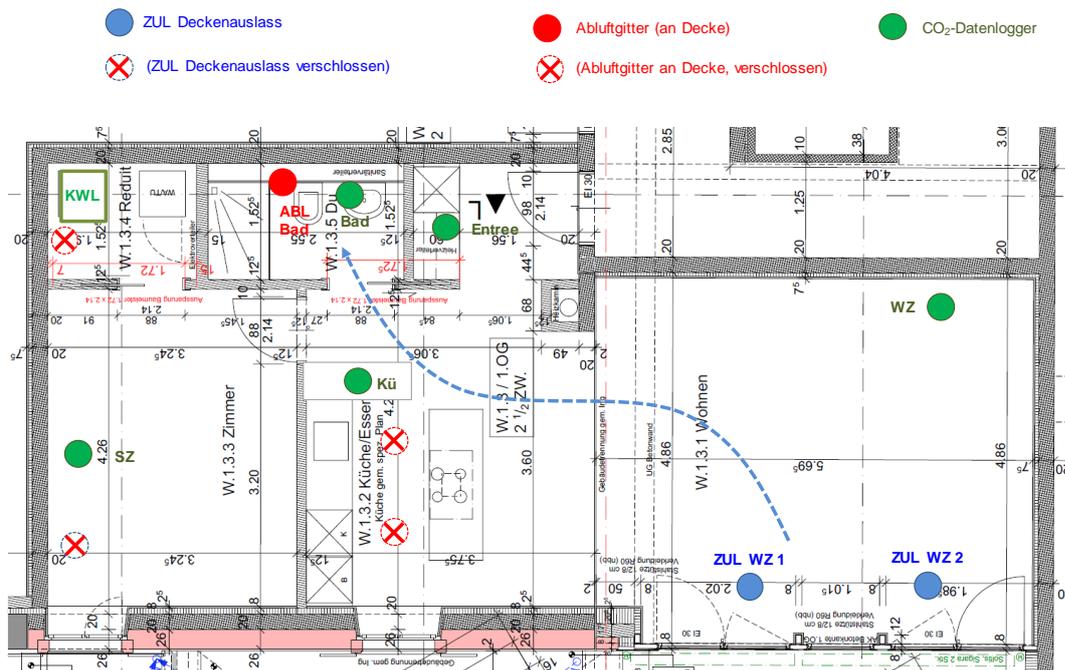


Abbildung 18: Messsituation bei Testmessungen ohne Zuluft im Schlafzimmer (System mit KWL-Gerät je Wohnung)

### 3.1.2 Resultate zum Einfluss der Türöffnung

Bei offener Türe stellt sich bei beiden Messsituationen eine vergleichbare CO<sub>2</sub>-Konzentration ein. In beiden Fällen wurde die Lüftung auf Stufe 2 betrieben. Dabei lag der gesamte Zuluftvolumenstrom in der Wohnung bei 65m<sup>3</sup>/h (Betriebsfall mit vereinfachtem Lüftungskonzept) bzw. bei 72 m<sup>3</sup>/h (üblicher Komfortlüftungsbetrieb, alle Luftdurchlässe offen). In der Messung in der Standardanordnung lag der Zuluftvolumenstrom im Schlafzimmer bei 30 m<sup>3</sup>/h. Bei geschlossener Schlafzimmertüre steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration ohne Zuluft im Schlafzimmer sehr stark an (Maximalwert über 4400 ppm). In der Messung mit Zuluft im Schlafzimmer und geschlossener Türe liegt die CO<sub>2</sub>-Konzentration konstant bei 1100 ppm. Bei den Türstellungen 5 cm und 10 cm zeigen sich erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für den Messfall ohne Zuluft im Schlafzimmer. Bei 10 cm Türspalt lagen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der gesamten Nacht unter 1400 ppm.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Messresultate jeweils für den Messfall mit reduzierter Luftverteilung (keine Zuluft im SZ, keine ABL in Reduit, ZUL im WZ, ABL im Bad; Lüftungsbetrieb auf Stufe 2) sowie in Abbildung 19 zusätzlich zum Vergleich mit der Standardanordnung (alle ZUL und ABL Durchlässe offen) dargestellt. Die Messdaten beinhalten jeweils die Nachtzeitspanne, in der das Schlafzimmer belegt war und die Schlafzimmertür auf eine bestimmte Öffnungsweite eingestellt war (geschlossen, 5 cm, 10 cm, 20 cm, ganz offen).

Aus den Messungen zeigt sich bei Türöffnungsweiten über 10 cm bereits eine gute Wirkung vom passiven Luftaustausch zwischen dem Schlafzimmer ohne Zuluft und dem Korridorbereich. Bereits bei einer Türspaltweite von 20 cm wurden nur noch leicht erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Schlafzimmer gemessen. Alle diese Messungen wurden in den Sommermonaten bei nächtlichen Aussentemperaturen im Bereich von etwa 12-24°C durchgeführt.

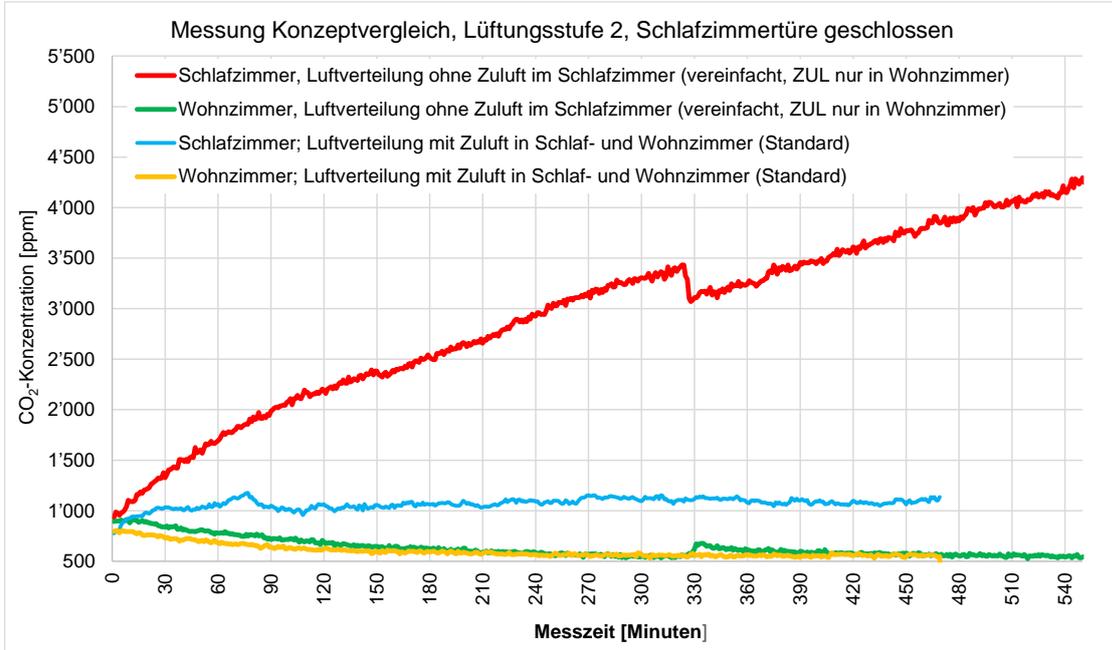


Abbildung 19: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre geschlossen

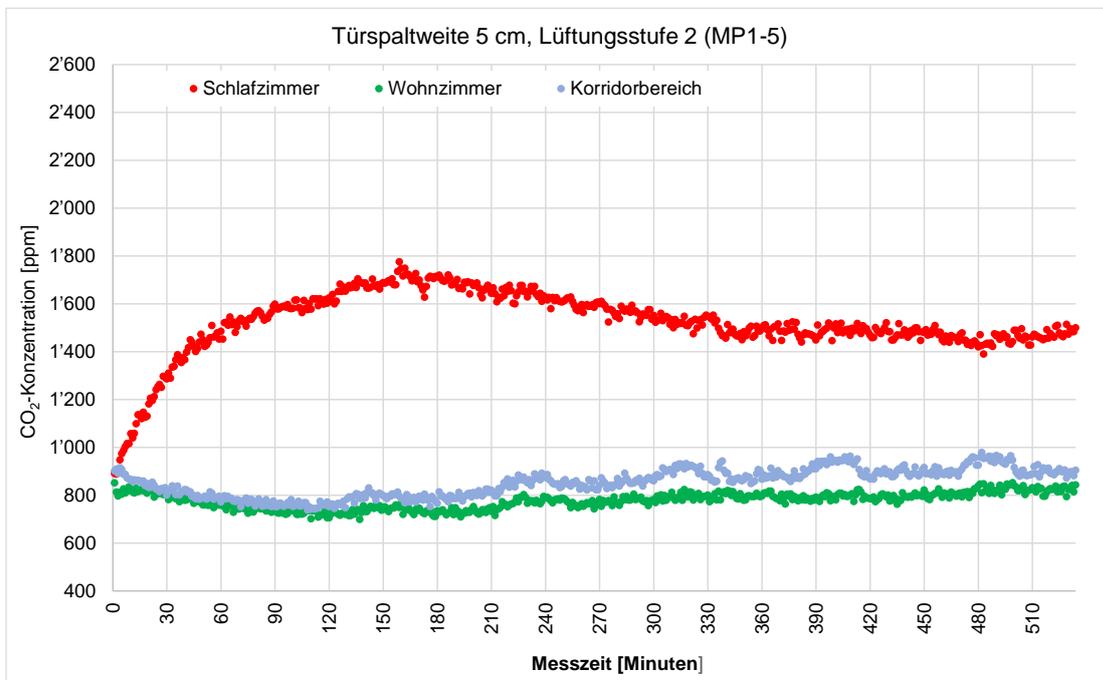
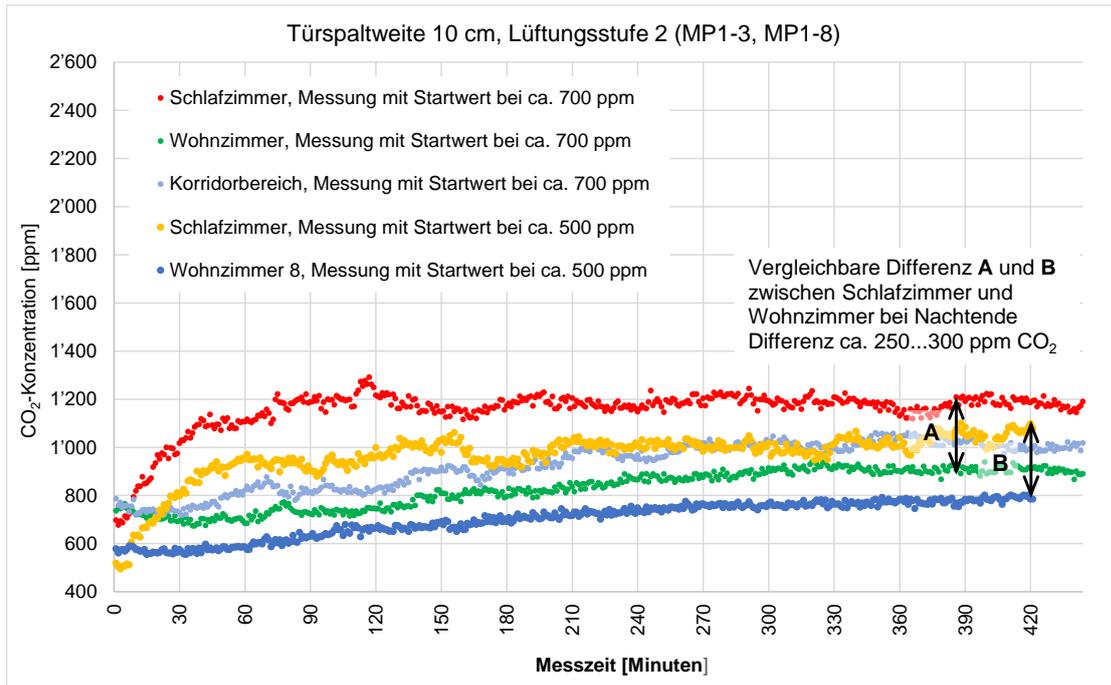
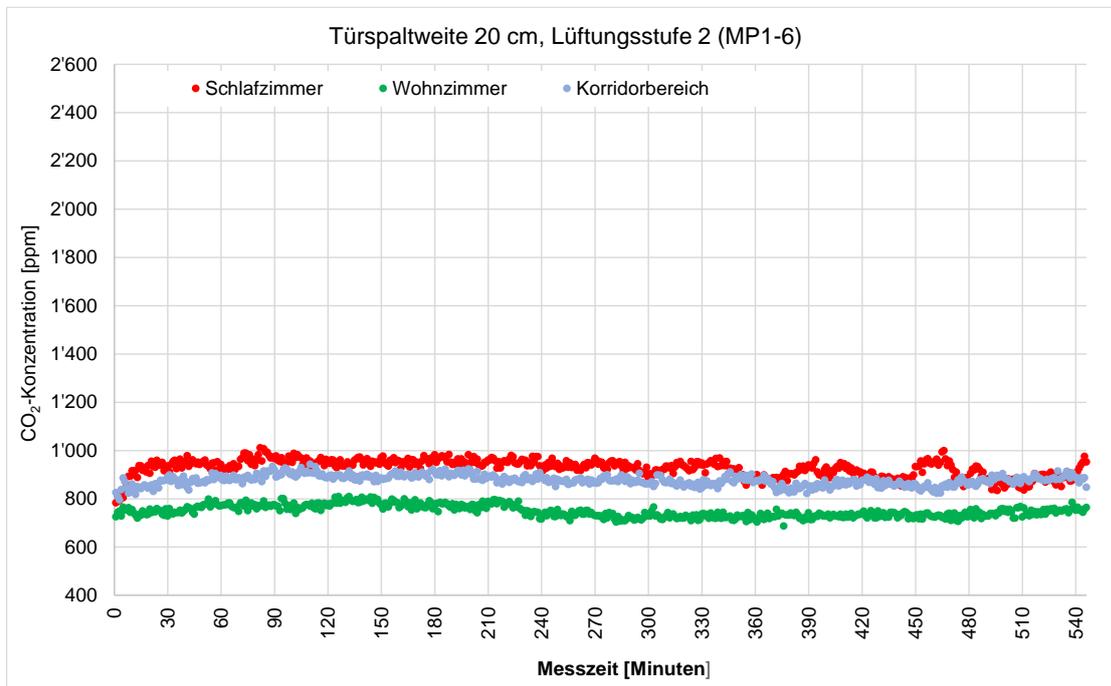
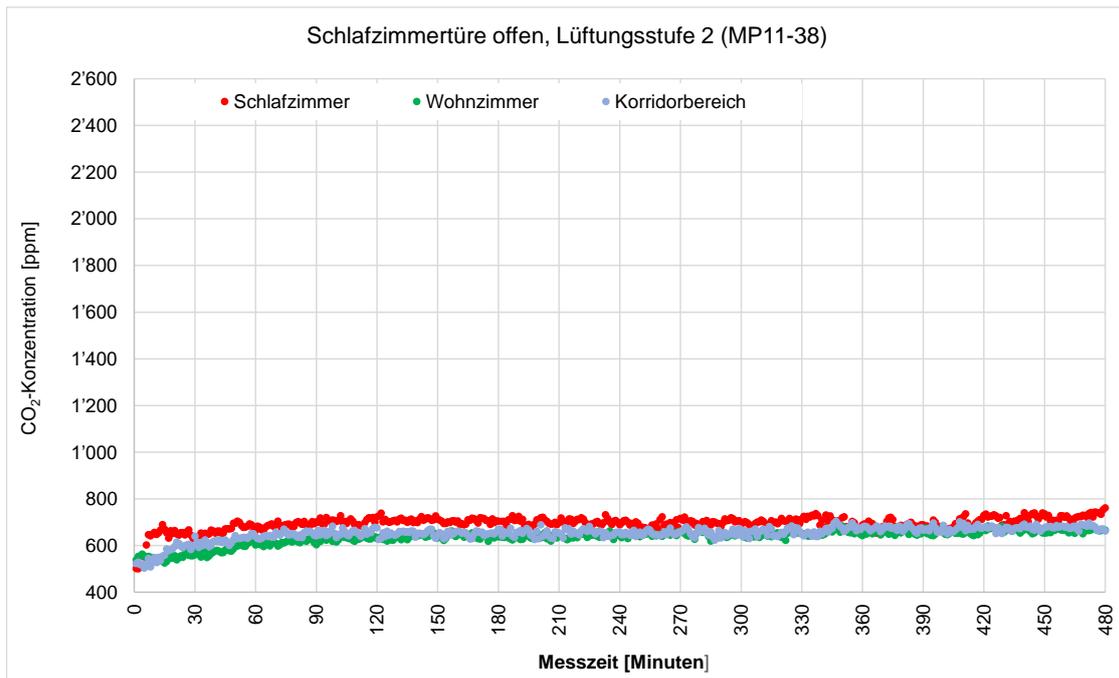


Abbildung 20: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre 5 cm offen

Abbildung 21: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre 10 cm offen

Die Messungen bei 10 cm Türspaltweite zeigten, dass sich die Differenz zwischen Schlafzimmer und Wohnzimmer bei Nachtende auf ca. 250 bis 300 ppm CO<sub>2</sub> einpendelt. Die Differenz zwischen den beiden dargestellten Messungen liegt in erster Linie im unterschiedlichen Startwert bei Messbeginn.

Abbildung 22: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre 20 cm offen

Abbildung 23: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre offen

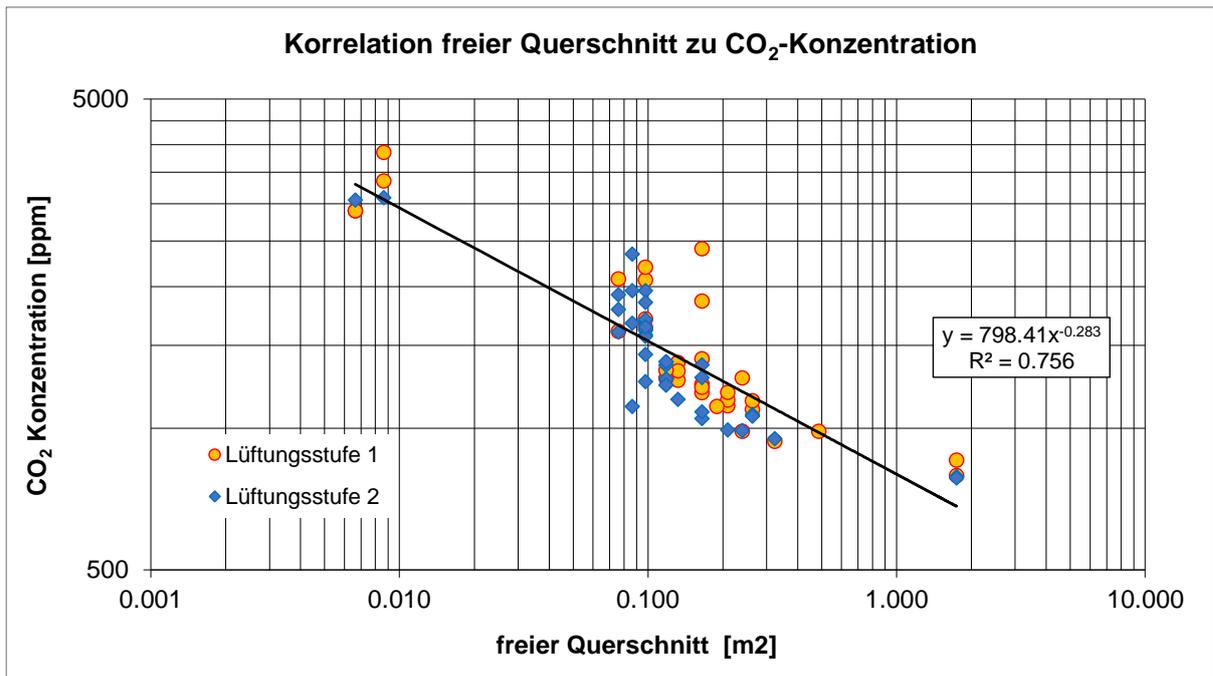
### 3.1.3 Resultate zum Einfluss des freien Querschnittes des Überströmelementes

Um Anhaltspunkte für den erreichten Luftaustausch für verschiedene Querschnitte zu erhalten, wurden in der 2½ Zimmer-Versuchswohnung Messungen mit teilweise verschlossenen Luftdurchlässen (ähnlich Zielsystem) und diversen Querschnitts-Varianten von passiven Überströmöffnungen gemessen. Abbildung 24 zeigt verschiedene Varianten der untersuchten Querschnitte. Wie die zusammenfassende Auswertung in Abbildung 25 zeigt, sind relativ grosse freie Querschnitte notwendig, um eine akzeptable Luftqualität zu erreichen. Für diese Auswertung wurde jeweils die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer in den letzten zwei Nachtstunden ausgewertet.

Basiselement (als Türersatz)  Möglichkeit zur Prüfung div. Querschnitte/ Elemente  «Türspalt» unten 1 [cm]	Freier Querschnitt (oben/unten)  Je 800x200 [mm]	Einfaches Gitter (nicht lichtdicht)  Oben und unten	Einfaches Gitter (nicht lichtdicht)  vertikal
			

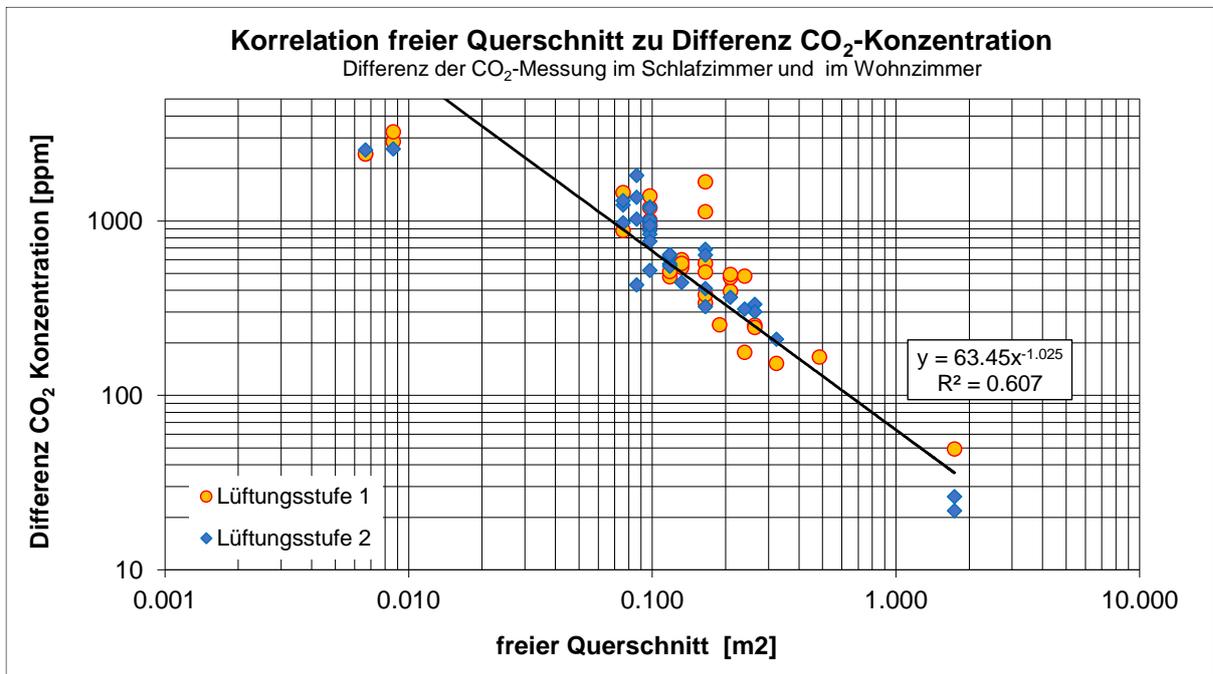
Abbildung 24: Aufbau der verschiedenen Typen der untersuchten Varianten von Überströmelementen

In der Auswertung in Abbildung 25 wurden die Resultate nach eingestellter Lüftungsstufe unterschieden (Stufe 1 = 39 m<sup>3</sup>/h Zuluft; Stufe 2 = 65 m<sup>3</sup>/h Zuluft). Daraus lässt sich bei der geringeren Luftmenge eine tendenziell höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration erkennen. In Abbildung 26 sind die Resultate für die Differenz der CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen Schlafzimmer und Wohnzimmer dargestellt. In dieser Auswertung ist, wie zu erwarten, die Differenz zwischen den Lüftungsstufen geringer.



**Bemerkung:** Auswertung ohne Unterscheidung der Varianten bezüglich der Geometrie des freien Querschnittes, den Aussentemperaturen, und anderen Einflussfaktoren (Raumtemperatur, Startkonzentration, etc.) Raumbelegung im gemessenen Schlafzimmer. 1 Person. Vergleich des Mittelwerts der letzten 2 Nachtstunden

Abbildung 25: CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer (Wert gegen Nachtende), bei verschiedenen freien Querschnitten



**Bemerkung:** Auswertung ohne Unterscheidung der Varianten bezüglich der Geometrie des freien Querschnittes, den Aussentemperaturen, und anderen Einflussfaktoren (Raumtemperatur, Startkonzentration, etc.) Raumbelegung im gemessenen Schlafzimmer. 1 Person. Vergleich des Mittelwerts der letzten 2 Nachtstunden

Abbildung 26: Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Wert gegen Nachtende), bei verschiedenen freien Querschnitten

In Abbildung 26 ist eine schlechte Korrelation der Werte bei sehr kleinen Querschnitten zu beobachten. Der Grund liegt in der in diesen Fällen auch nach 8 Stunden nicht erreichte Stabilisierung der Konzentration im Schlafzimmer. Siehe dazu auch Abbildung 19.

Im Folgenden werden beispielhaft die Resultate für unterschiedliche Querschnittvarianten aufgezeigt. Weitere Details zum verwendeten Messaufbau sind in Kapitel 3.1.1 beschrieben. Alle Messungen wurden mit Lüftungsstufe 1 (Zuluftvolumenstrom im Wohnzimmer 39 m<sup>3</sup>/h, Abluft nur im Bad) durchgeführt. Die Belegung des Schlafzimmers war in allen Messungen eine Person.

Abbildung 27 zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer, Wohnzimmer sowie dem Korridorbereich mit freien Querschnittsöffnungen oben und unten an der Schlafzimmertüre. Der gesamte freie Querschnitt beträgt bei dieser Variante 0.323 m<sup>2</sup> (inkl. Türspalt unten). Die Aussentemperatur in den letzten zwei Stunden der Nacht betrug in dieser Messung 14°C.

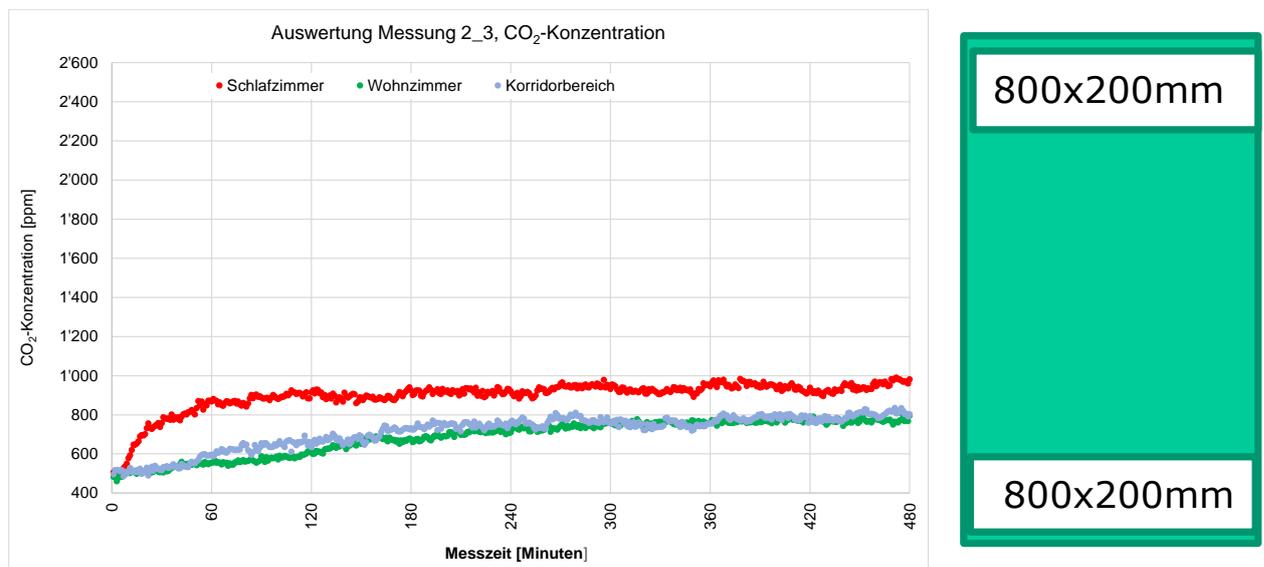
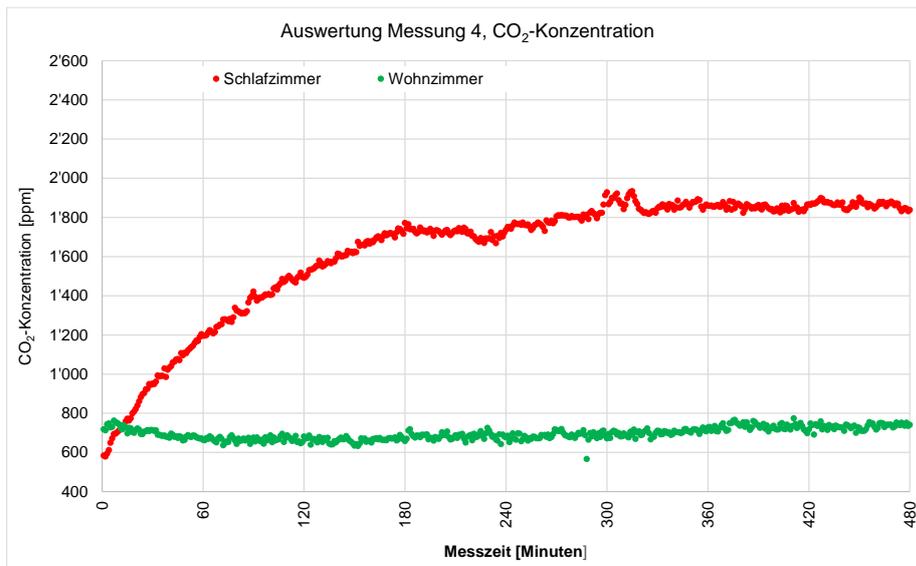


Abbildung 27: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Nacht, freier Querschnitt oben und unten;  $A_{\text{Frei}} = 0.323 \text{ m}^2$

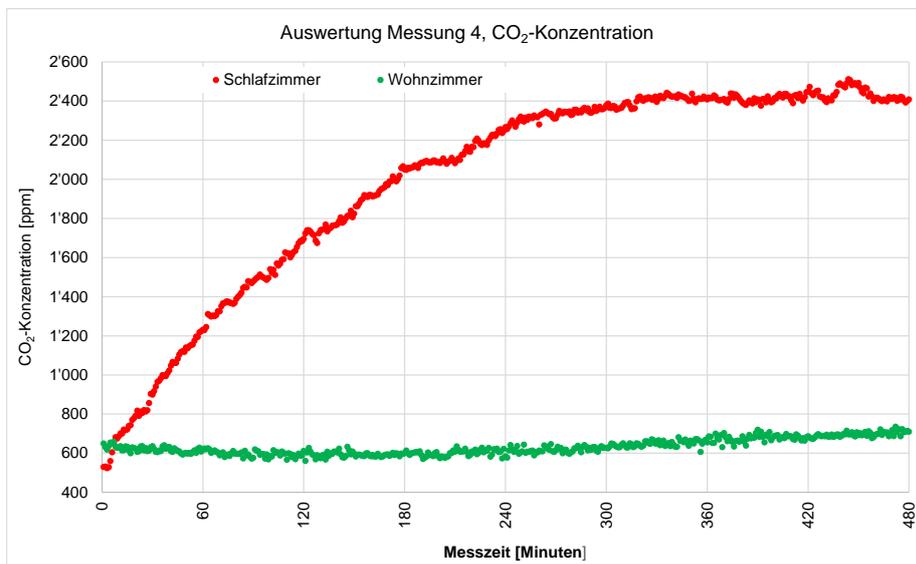
Abbildung 28 zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer und Wohnzimmer mit freien Querschnittsöffnungen nur oben an der Schlafzimmertüre. Der gesamte freie Querschnitt beträgt bei dieser Variante 0.165 m<sup>2</sup> (inkl. Türspalt unten). Die Aussentemperatur in den letzten zwei Stunden der Nacht betrug in dieser Messung 5°C. Durch den Türspalt unten am Element scheint sich ein leicht höherer Luftwechsel einzustellen als in der Variante, in der der Querschnitt nur unten angeordnet ist (die in Abbildung 29). Insgesamt ist die Situation jedoch deutlich ungünstiger als in der Variante mit identischen Querschnitten oben und unten. Im Vergleich dazu ist jedoch der freie Querschnitt hier nur etwa halb so gross.



800x200mm

Abbildung 28: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Nacht, freier Querschnitt nur oben;  $A_{\text{Frei}} = 0.165 \text{ m}^2$ 

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer und Wohnzimmer mit freien Querschnittöffnungen nur unten an der Schlafzimmertüre. Der gesamte freie Querschnitt beträgt bei dieser Variante 0.165 m<sup>2</sup> (inkl. Türspalt unten). Die Aussentemperatur in den letzten zwei Stunden der Nacht betrug in dieser Messung 11°C.



800x200mm

Abbildung 29: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Nacht, freier Querschnitt nur unten;  $A_{\text{Frei}} = 0.165 \text{ m}^2$ 

Abbildung 30 zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer und Wohnzimmer mit verkleinerten freien Querschnittöffnungen oben und unten an der Schlafzimmertüre. Mit dieser Variante wird ein vergleichbarer freier Querschnitt wie mit den letzten beiden Varianten erreicht. Der freie Querschnitt beträgt bei dieser Variante 0.165 m<sup>2</sup> (inkl. Türspalt unten). Die Aussentemperatur in den letzten zwei Stunden der Nacht betrug in dieser Messung 9°C.

In dieser Variante ist trotz vergleichbarem Querschnitt eine bessere Lüftungswirkung zu sehen.

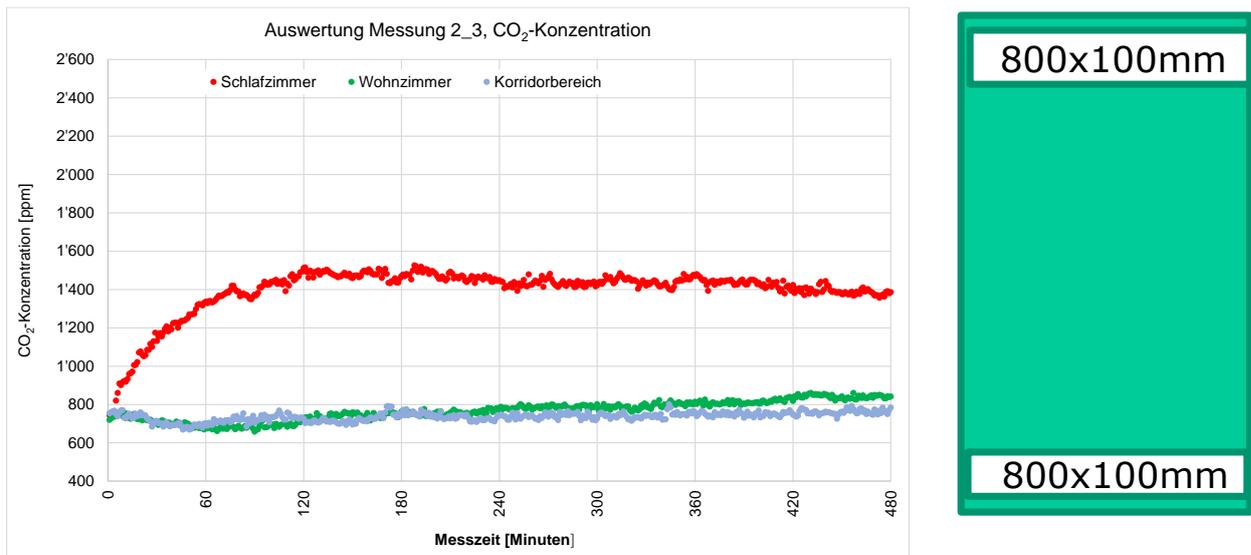


Abbildung 30: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Nacht, verkleinerter freier Querschnitt oben und unten;  $A_{\text{Frei}} = 0.165 \text{ m}^2$

Abbildung 31 zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer und Wohnzimmer mit grossen Querschnittsöffnungen oben und unten an der Schlafzimmertüre, die aber mit einem Schräggitter leicht abgeschirmt sind (jedoch nicht lichtdicht, da Lamellenabstand maximal gross). Der gesamte freie Querschnitt beträgt bei dieser Variante ebenfalls 0.165 m<sup>2</sup> (inkl. Türspalt unten). Die Aussentemperatur in den letzten zwei Stunden der Nacht betrug in dieser Messung 10°C. Diese Variante hat bei vergleichbarem freiem Querschnitt eine bessere Wirkung, benötigt aber sehr viel Platz und ist nicht licht/blickdicht.

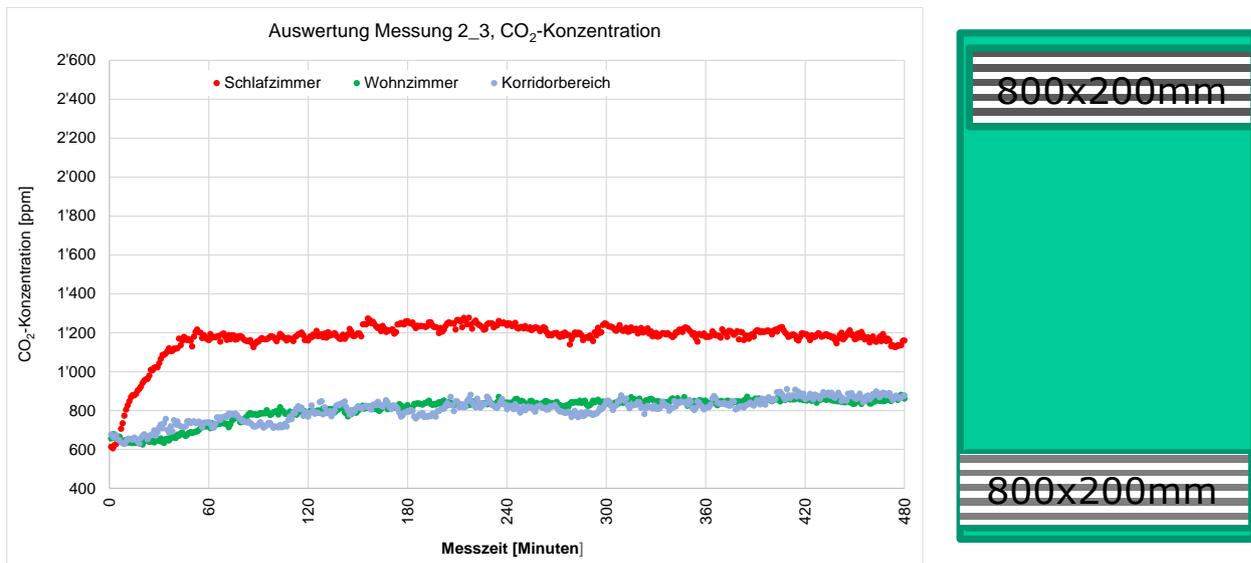


Abbildung 31: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Nacht, Gitter oben und unten, max. Lamellenabstand;  $A_{\text{Frei}} = 0.165 \text{ m}^2$

Abbildung 32 zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer und Wohnzimmer mit einem vertikal angeordneten einfachen Gitterelement an der Schlafzimmertüre. Der Lamellenabstand vom Gitter beträgt ca. 10 mm. Das Gitter ist nicht lichtdicht. Der gesamte freie Querschnitt beträgt bei dieser Variante 0.076 m<sup>2</sup> (inkl. Türspalt unten). Die Aussentemperatur in den letzten zwei Stunden der Nacht betrug in dieser Messung 13°C.

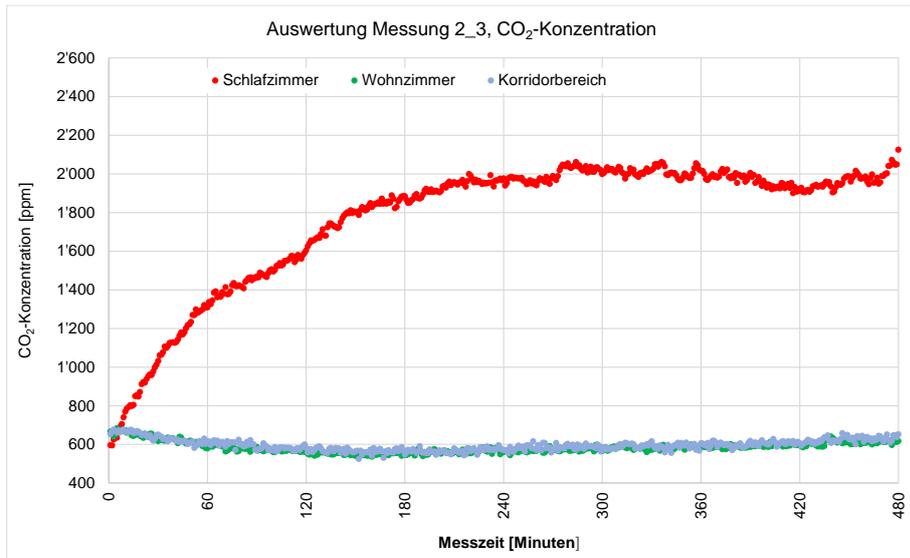


Abbildung 32: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Nacht, Gitter vertikal angeordnet;  $A_{\text{Frei}} = 0.076 \text{ m}^2$

Abbildung 33 zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer und Wohnzimmer mit einem horizontal angeordneten einfachen Gitterelement oben und unten an der Schlafzimmertüre. Der gesamte freie Querschnitt wurde bei dieser Variante vergleichbar gehalten und beträgt 0.076 m<sup>2</sup> (inkl. Türspalt unten). Die Aussentemperatur in den letzten zwei Stunden der Nacht betrug in dieser Messung 13°C. Aus den Resultaten ist tendenziell eine bessere Wirkung als beim vertikalen Gitter abzulesen. Diese Einschätzung basiert jedoch nur auf einer Messung.

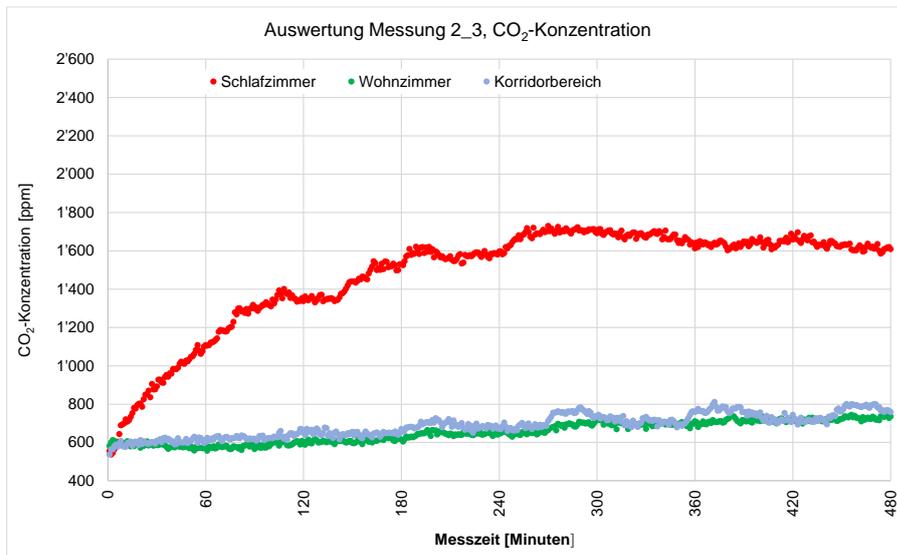


Abbildung 33: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Nacht, Gitter horizontal angeordnet; oben und unten;  $A_{\text{Frei}} = 0.076 \text{ m}^2$

Abbildung 34 zeigt den Verlauf mit demselben Lüftungsgitter (nicht lichtdicht) wie in der Vorvariante, aber mit erhöhtem Querschnitt. Das Gitter wurde wiederum oben und unten an der Türe eingesetzt. Der gesamte freie Querschnitt wurde in dieser Variante erhöht und beträgt bei dieser Variante 0.132 m<sup>2</sup> (inkl. Türspalt unten). Die Aussentemperatur in den letzten zwei Stunden der Nacht betrug in dieser Messung 14°C. Aus dem Resultat ist eine entsprechend dem grösseren freien Querschnitt bessere Lüftungswirkung zu sehen.

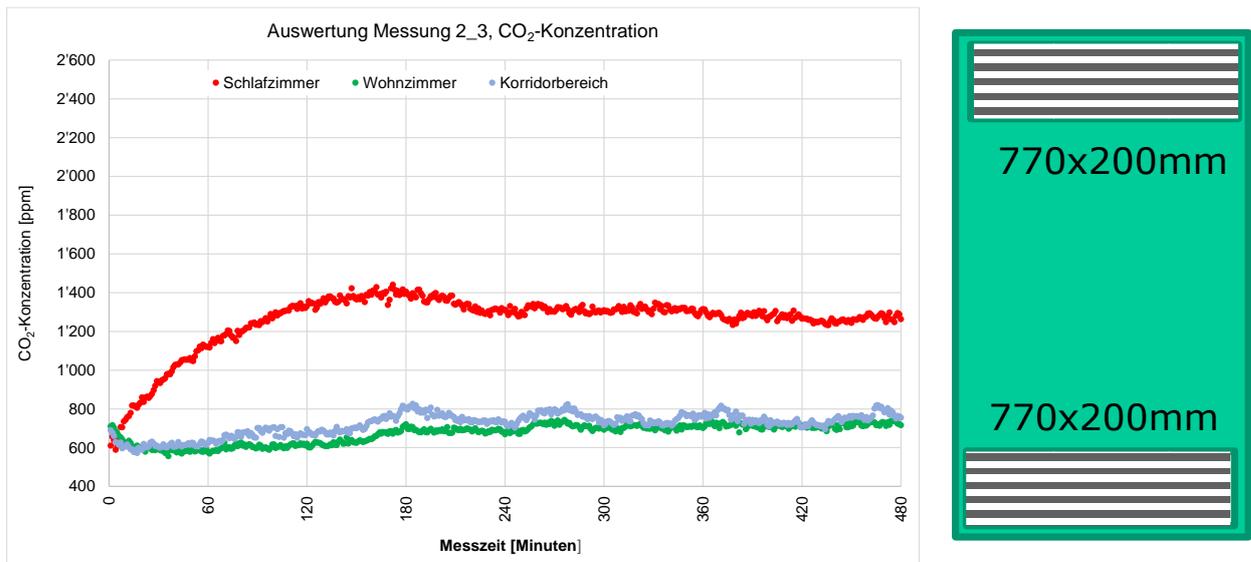


Abbildung 34: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Nacht, vergrößertes Gitter horizontal; oben und unten;  $A_{\text{Frei}} = 0.132 \text{ m}^2$

### 3.1.4 Resultate für ein am Markt erhältlichen Überströmelementes

Aus den vorgehenden Resultaten interessierte vor allem, ob ein geeignetes Überströmelement am Markt verfügbar ist, bzw. welche Eigenschaften dieses aufweisen müsste, um einen möglichst guten passiven Luftaustausch zu ermöglichen, bei gleichzeitiger Gewährleistung einer gewissen Schalldämmung und möglichst ohne direkten Lichtdurchlass. Aus Abklärungen zu geeigneten (in ähnlicher Art) bereits am Markt erhältlichen Elementen wurde ein einfach aufgebauter Elementtyp als interessant erachtet. Die am Markt erhältliche Version dieser Elemente wird beispielsweise von folgenden zwei Herstellern verkauft: Swegon Typ. Orto 700 bzw. von Fläkt Typ: BYSE 700. Für die Anordnung wird von je 1 Element oben und unten an der Türe ausgegangen. Damit für die Messungen eine Variation verschiedener Parameter (z.B. Abstand vom Türblatt etc.) verändert werden kann, wurde ein vergleichbares Element zu Versuchszwecken aufgebaut. Abbildung 35 zeigt den Aufbau des für die Messungen verwendeten Elementes. Um für einen Luftaustausch mit konvektivem Antrieb möglichst geeignete Öffnung zu erhalten, wird je ein Element am oberen bzw. unteren Rand der Türe angeordnet.

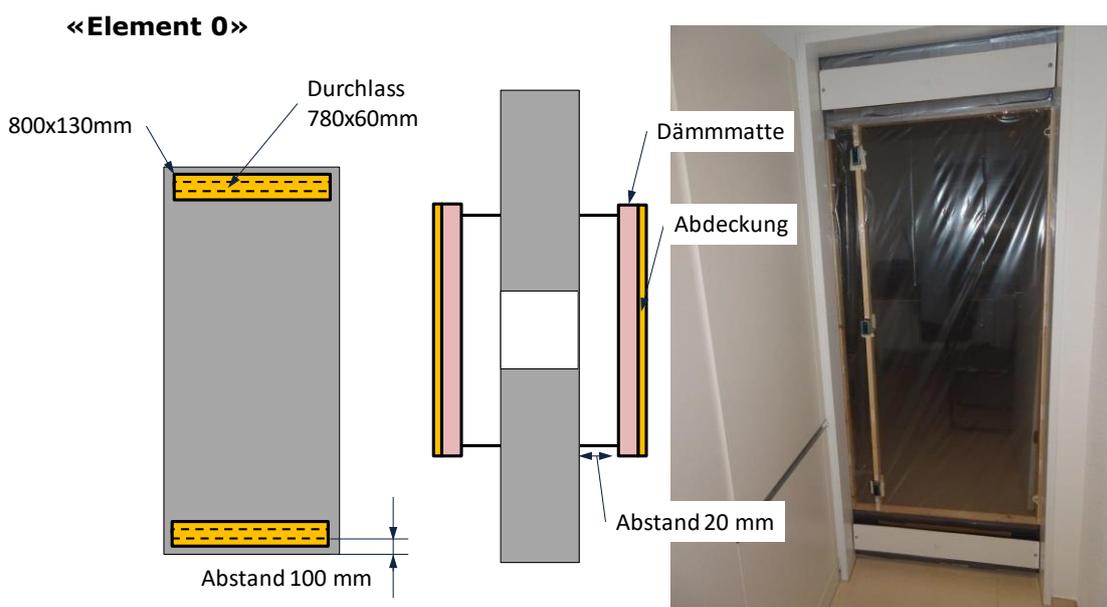


Abbildung 35: Aufbau des Überströmelementes für die Messungen in der Testwohnung

In Abbildung 36 und Abbildung 37 sind die Messresultate für dieses Element in der Testwohnung (Belegung 1 Person) bei Aussentemperaturen (Nachttemperatur) von ca. 10°C dargestellt. Dabei zeigen sich unabhängig von der Lüftungsstufe (Stufe 1: 46 m<sup>3</sup>/h, Stufe 2: 69 m<sup>3</sup>/h) recht ähnliche Ergebnisse. Dies ist vermutlich auf die tiefe Personenbelegung zurückzuführen.

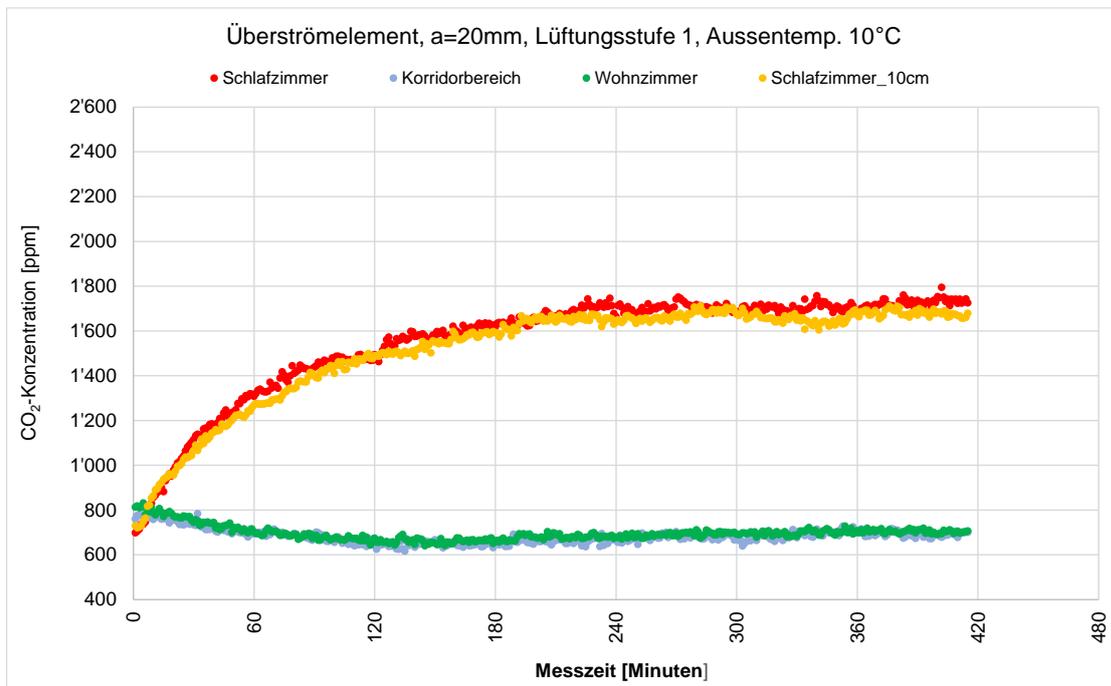


Abbildung 36: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Schlafzimmer, Nacht, T<sub>a</sub> 10°C, Lüftungsstufe 1, Element: a=20mm

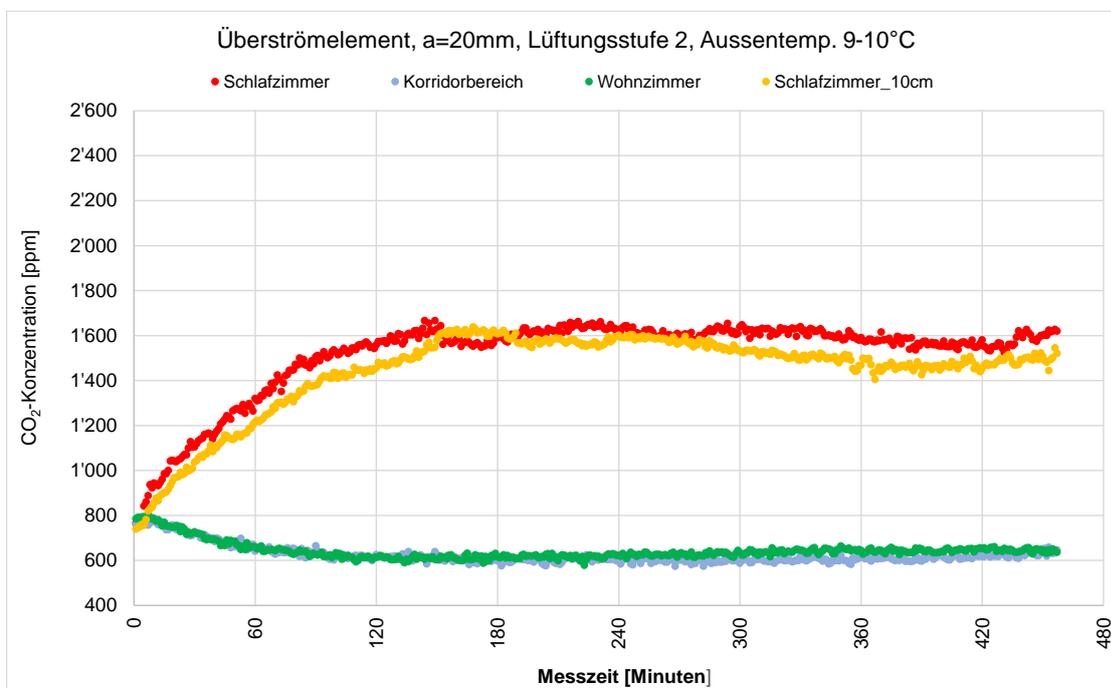


Abbildung 37: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Lüftungsstufe 2, Element: a=20mm

In Abbildung 38 und Abbildung 39 sind die Messresultate mit dem gleichen Element bei höheren Aussentemperaturen (Nachttemperatur) dargestellt. In der Nacht mit Messung auf Lüftungsstufe 1 sank die Aussentemperatur von 16°C auf etwa 12°C. In der Nacht mit der Messung auf Lüftungsstufe 2 war die

Aussentemperatur etwas konstanter (Anfangs bei knapp 17°C, Minimum bei 16°C gegen Morgen auf 20°C steigend).

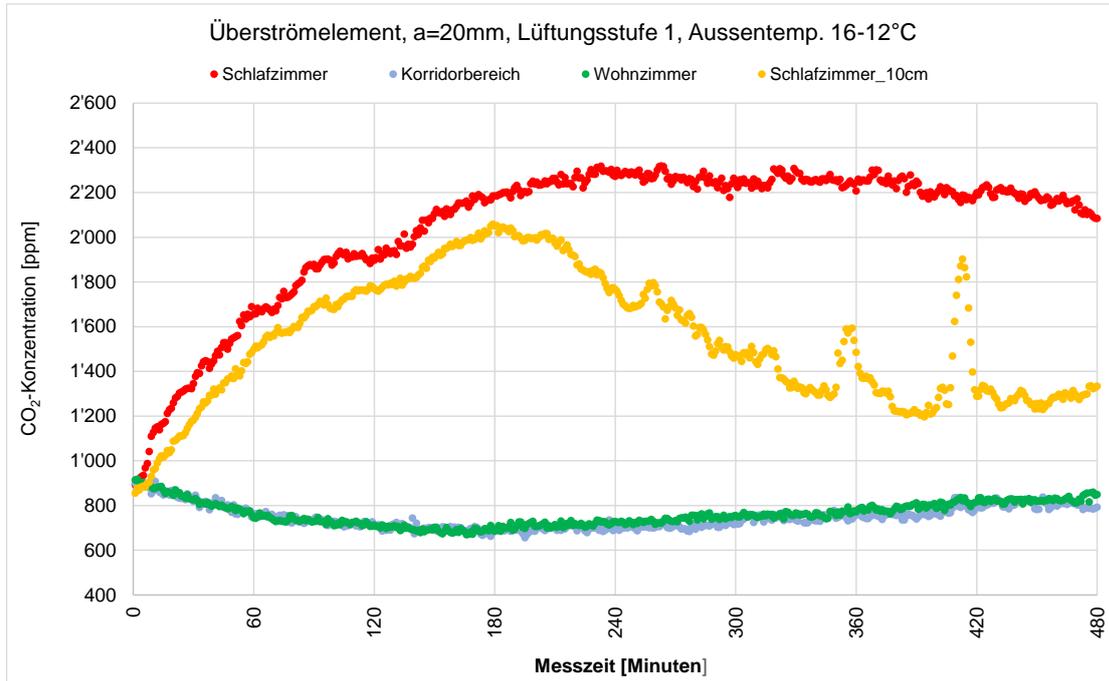


Abbildung 38: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Schlafzimmer, Nacht, T<sub>a</sub> 16-12°C, Lüftungsstufe 1, Element: a=20mm

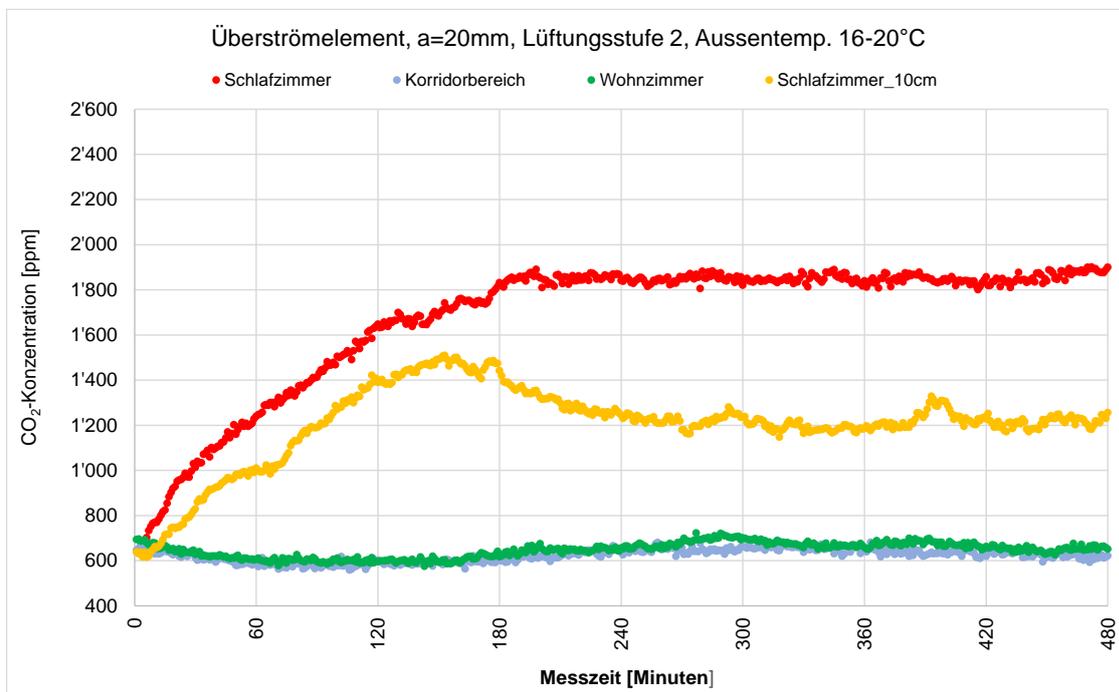


Abbildung 39: Verlauf CO<sub>2</sub>-Konzentration, Schlafzimmer, Nacht, T<sub>a</sub> 16-20°C, Lüftungsstufe 2, Element: a=20mm

Im Vergleich mit den Messungen bei 10°C Aussentemperatur zeigen die Messungen bei der höheren (und weniger konstanten) Aussentemperatur bei der Lüftungsstufe 2 eine um gut 200 ppm höhere CO<sub>2</sub> Konzentration am Ende der Nacht. Bei der Messung mit Lüftungsstufe 1 ist der Wert sogar um etwa 500 ppm höher. In dieser Messung zeigt sich auch ein Absinken der Konzentration gegen den Morgen hin. Beide Messungen zeigen gegenüber der Messung bei etwa 10°C Aussentemperatur (konstante Bedingungen), dass der Messwert der CO<sub>2</sub> Konzentration in Bodennähe des Schlafzimmers (10 cm über

Boden) viel stärker variiert. Dies lässt auf gewisse Schichtungseffekte schliessen, die vermutlich auch mit den ändernden Aussenbedingungen zusammenhängen.

Als Fazit dieses Vergleichs kann festgehalten werden, dass das untersuchte passive Überströmelement deutliche Beeinflussungen durch die äusseren Umstände zeigt. Wie bereits vermutet, ist die Wirkung bei höheren Aussentemperaturen durch die geringere Temperaturdifferenz ungünstiger. Wenn konstante Verhältnisse vorhanden sind, wie dies bei der Messung mit 10°C Aussentemperatur der Fall war, scheint sich durch die Temperatur- bzw. Druckdifferenzen ein stabiler Luftwechsel einzustellen. Da sowohl bei der CFD-Simulation wie auch bei der Messung im Forschungshaus «ROTEG» sehr konstante Bedingungen herrschen, können diese Resultate nicht einfach auf die Praxis übertragen werden.

## 3.2 Messungen in realisiertem Gebäude

In einer Wohnsiedlung in Zürich werden zwei Messungen in unterschiedlichen Wohnungen durchgeführt. Es handelt sich um eine dreieinhalb (Wohnung 1) und eine viereinhalb (Wohnung 2) Zimmer-Wohnung. Es soll die Luftqualität bei einer Kaskadenlüftung mit Zuluft einbringung im Flur und anschliessender Abluftabfuhr in den Nassräumen und der Küche mit Überströmung durch Wohn- und alle Schlaf-, beziehungsweise Kinderzimmer überprüft werden.

Gemessen werden die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die relative Feuchte, die Temperatur, der Differenzdruck gegen aussen in allen Schlafzimmern und im Wohnzimmer (3 Stück für 3.5 Zimmer-Wohnung; 4 Stück für 4.5 Zimmer Wohnung). Weiterhin werden die Öffnungsgrade der Innentüren und Fenster nach aussen hin dokumentiert; zudem werden die Aussenbedingungen gemessen.

Die Messperiode wird auf den Zeitraum ab 29./31. Oktober (KW 44) der Kalenderwoche bis 27. November 2019 (KW 48) gelegt.

### 3.2.1 Objekt

Die Messungen wurden in zwei Wohnungen in einer Wohnsiedlung in Zürich durchgeführt. Diese Siedlung wurde 1970 bis 1973 gebaut und 2015 bis 2017 gesamterneuert.

Im Rahmen dieser Erneuerung wurden die Gebäude mit ursprünglich 220 Wohnungen durch Auflösung von 52 Kleinwohnungen (zu 26 Familienwohnungen) auf aktuell 194 Wohnungen mit 1.5- bis 5.5-Zimmer verändert. Dabei entstanden 3 Haupttypen mit offenen Wohn-Essküchen, wovon ein Typ als Maisonette-Wohnung mit Unterteilung in Wohn-Ess- und Schlafbereich umgesetzt wurde. Im Weiteren wurden Küchen und Nasszellen vollständig erneuert und mit einer zentralen Lüftungsanlage ausgerüstet, die der gesamten Wohnung einen gewissen Luftwechsel ermöglicht.

Im umgesetzten Konzept wird dabei die Zuluft über abgehängte Badezimmerdecken zu einem Durchlass in den Korridor eingeströmt. Die Verteilung in die einzelnen Zimmer erfolgt von dort rein thermisch bedingt, das heisst ohne aktive Überströmer, sondern über geöffnete Türen.

In den Nasszellen und im Kochbereich wird die Abluft gefasst und über das Lüftungsgerät mit WRG abgeführt. Für die Einstellung der Luftmenge in den Wohnungen sind für jede Wohnung Volumenstromregler eingebaut.



## 2.5 Zi-Wohnung

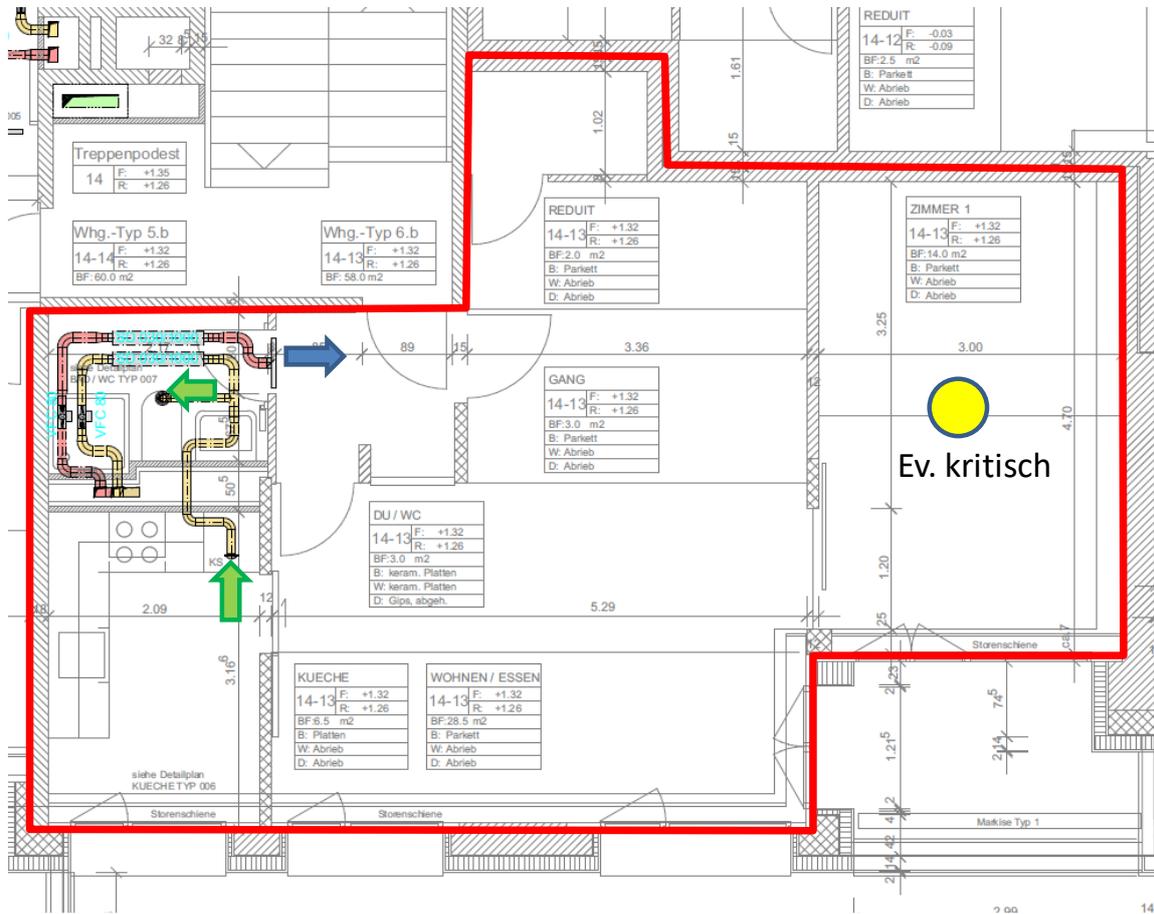


Abbildung 41: Planauszug ungünstiger Grundriss 2.5-Zi WNG (Bildquelle: Amt für Hochbauten 2017)

### Messausrüstung:

Bevor die Messausrüstung installiert wird, wird noch geklärt, ob die umfangreiche Messausrüstung, die aktuell vorgesehen ist, von den Bewohnern akzeptiert wird. Die Bewohner in den ausgewählten Wohnungen sollten daher dem Messprojekt Wohlwollen entgegenbringen. Allerdings sollten sie sich möglichst «normal» verhalten während der Messzeit, um möglichst realistische Resultate zu erhalten.

Aus den Resultaten der Testmessungen wird noch detaillierter ermittelt, an welchen Standorten eine Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (neben der Temperatur und rel. Feuchte) sinnvoll ist.

Folgende Messausrüstung wird für die beiden Wohnungen vorgeschlagen:

- CO<sub>2</sub>-Messung in den untersuchten Schlafzimmern (je nach Wohnungsgrösse/ Bewohnerzahl und Nutzung 1 oder 2 Zimmer)
- Aufzeichnung der Türstellung bei den Türen die vom Korridor (bzw. offene Bereiche mit Zuluft) in das Zimmer führen, in dem eine CO<sub>2</sub>-Messung erfolgt.
- CO<sub>2</sub>-Messung im Korridorbereich bzw. im offenen Wohnbereich in Nähe Zuluftauslass
- Temperatur und rel. Feuchte im Bad
- Vor Messbeginn werden die Luftmengen (Zuluft, Abluft) in den untersuchten Wohnungen gemessen.

Die Aussenbedingungen werden primär über Daten aus einer nahegelegenen Meteostation (Station Mythenquai) erfasst. Die lokalen Aussenbedingungen (Temperatur, Feuchte) werden zudem im Aussenbereich einer Wohnung gemessen (sonnengeschützte Aufstellung des Loggers auf Balkon).

### 3.2.3 Übersicht Messresultate Luftmengen und Belegung

Die Luftmengen für die jeweiligen Wohnungen werden kurz und übersichtlich in der folgenden Tabelle dargestellt. Diese Messung erfolgte zu Beginn der Messperiode. Die Luftmenge wurde nicht mitgeloggt, da das zentrale Lüftungsgerät konstant betrieben wird und der Luftstrom daher konstant bleiben wird. Zur Luftmengenmessung ist anzumerken, dass die Abluft der Küche nicht gemessen werden konnte, da der Auslass unzugänglich hinter der Küchenkombination eingebaut ist. Dementsprechend wird die Küchenabluft aus der Bilanz der Zuluft im Flur und der Abluft im Bad ermittelt. Im Falle mit offenen Türen wird ein leichter Unterdruck gegen aussen von zwei bis drei Pascal gemessen. Daraus kann geschlossen werden, dass die Abluft in der Küche höchstens dem Differenzvolumenstrom aus der Luftmengenbilanz entsprechen kann. Die Messung der Zuluftvolumenströme wurde zudem mit geschlossenen Türen durchgeführt, um allfällige Differenzen durch die Türstellung beurteilen zu können.

Türstellung (wohnungsinterne Türen)		Wohnung 1		Wohnung 2 *)	
		Türen offen	Türen geschlossen	Türen offen	Türen geschlossen
Luftmengen	Zuluft [m <sup>3</sup> /h]: Flur	78	75	86	85
	Abluft [m <sup>3</sup> /h]: Bad	37	-	-70	-
	Abluft [m <sup>3</sup> /h]: Bilanz **)	41	-	-15	-
Temperatur [°C]: Flur		19.8	21.1	21.6	23.0
Feuchte [%]: Flur		49	48	47	43
Temperatur [°C]: Bad		21.9	-	23.0	-
Feuchte [%]: Bad		62	-	61	-
Umgebungsdruck [hPa]		962	962	962	962
Differenzdruck gegen Aussen [Pa] ***)		-3	-	-1.8	-
Belegung		3 Personen		4 Personen	
Zuluft pro Person [m <sup>3</sup> /h]		26	25	22	21

\*) Wohnung mit 2 Zuluftgitter und 2 WC/Badräumen. Summe der beiden Messwerte dargestellt.

\*\*) berechnete Bilanz zur Zuluft (entspricht ABL Küche + Infiltration durch Gebäudehülle)

\*\*\*) Differenzdruck gemessen zwischen Wohnzimmer und Aussen

Tabelle 2: Übersicht Luftmengen und Belegung der untersuchten Wohnungen

### 3.2.4 Messresultate und Erkenntnisse Wohnung 1

In einem ersten Schritt werden die einzelnen Messwerte innerhalb eines 24-Stunden Zeitraums ausgewertet. Die Auswertung eines Tages, siehe Abbildung 42, startet gegen 19:00:00 Uhr und die 1440 Werte entstehen durch 24 Stunden Daten (Minutenwerte). Es wird davon ausgegangen, dass Zimmer 2 von zwei erwachsenen Personen belegt ist. Für das Zimmer 1 wird von einer Belegung mit einer Person (Kind) ausgegangen. Insgesamt wird die Wohnung von drei Personen bewohnt. Durchschnittlich steht jeder Person ein Zuluft-Volumenstrom von 25 m<sup>3</sup>/h zur Verfügung.

Sind Tür (grüne Linie) und Fenster (blaue Linie) geschlossen, so steigt die Konzentration (rote Linie) kontinuierlich an, bis entweder Tür oder Fenster wieder geöffnet werden. Im Maximalfall ist die Konzentration in einer Nacht bis auf 4000 [ppm] angestiegen wie in Abbildung 42 gezeigt. Dem effektiv entgegenwirken kann das Öffnen der Tür oder des Fensters. Dadurch wird die hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration im Zimmer stark reduziert, wie dies aus Abbildung 42 am Morgen ersichtlich ist.

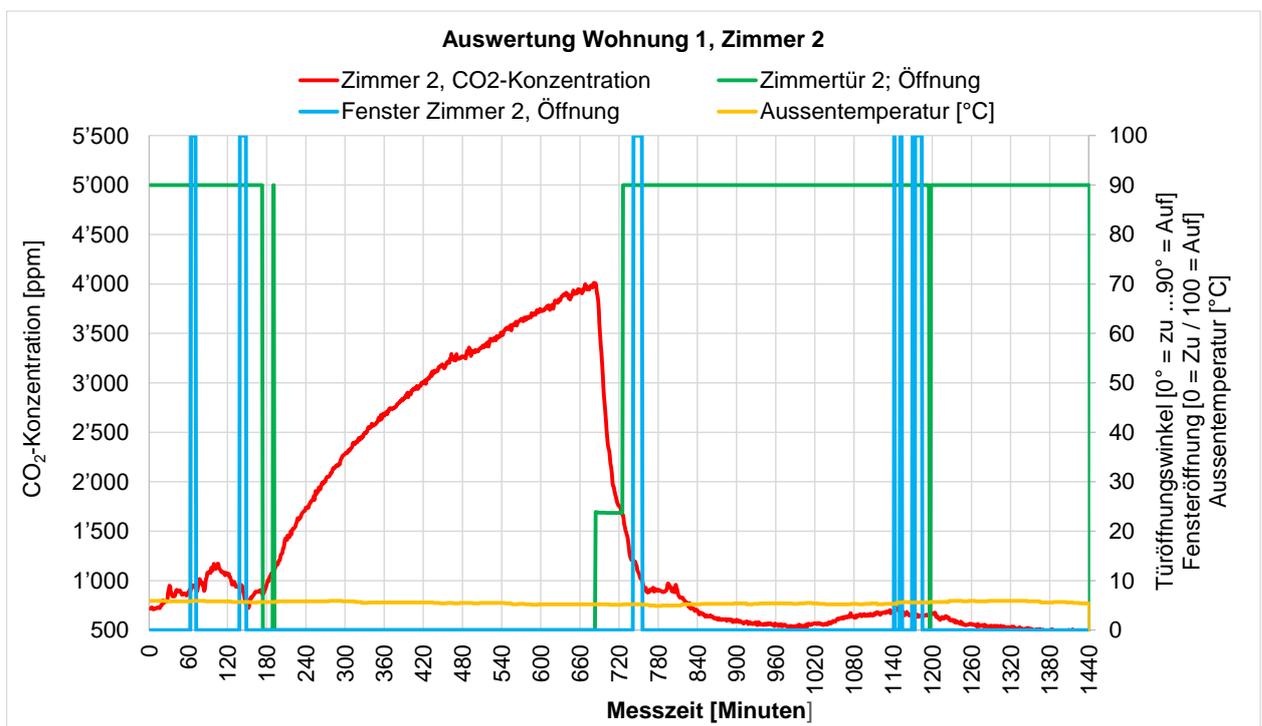


Abbildung 42: Wohnung 1; Zimmer 2; Ungünstigste Nachtperiode mit geschlossener Zimmertüre / Fenster

In typischen Nächten stieg die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Zimmer 2 der Wohnung bei geschlossener Türe und Fenster bis auf gut 2700 [ppm] an wie in Abbildung 43 gezeigt. Inwieweit dies auf eine abweichende Belegung in der Nachtperiode in Abbildung 42 oder auf eine ganz leicht geöffnete Türe (unterhalb der Anzeigeschwelle des Messaufnehmers) konnte nicht ermittelt werden.

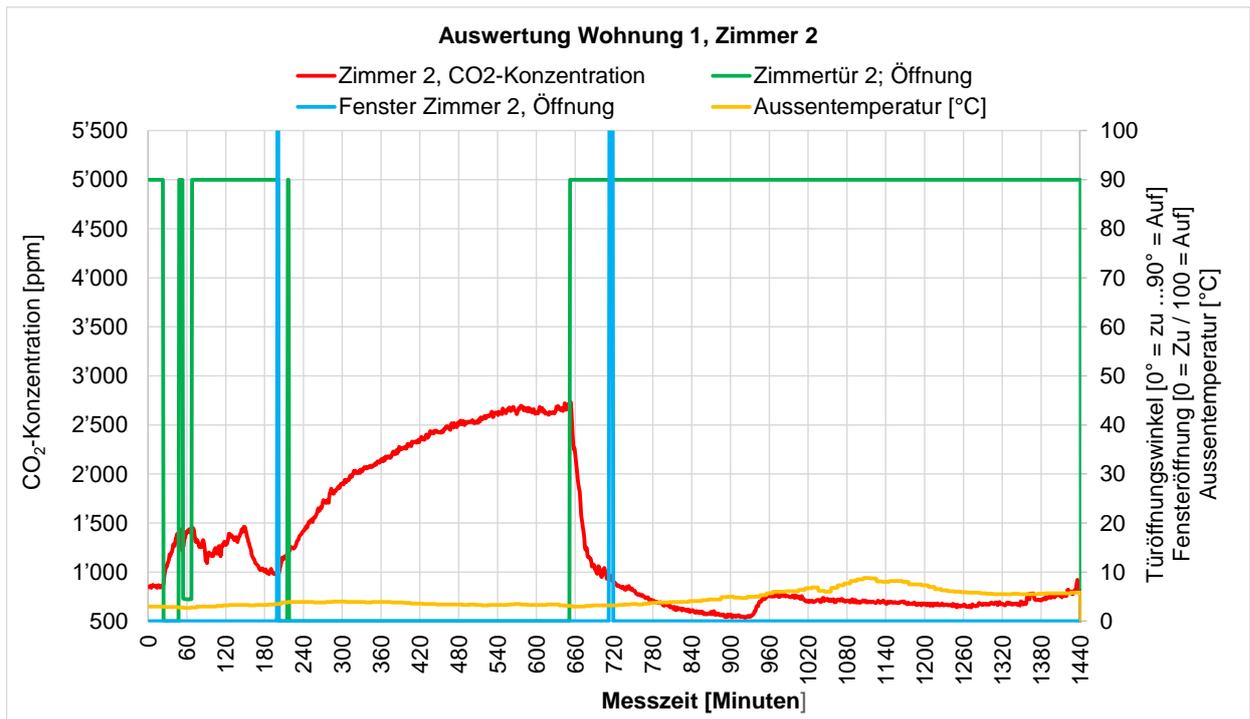


Abbildung 43: Wohnung 1; Zimmer 2; Typische Nachtperiode mit geschlossener Zimmertüre / Fenster

Bereits ein kurzes Öffnen des Fensters in der Nacht kann zu einem deutlichen Absinken der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft führen. Dies ist in Abbildung 44 im Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer ca. in Nachtmitt zu sehen. Nach dem Schliessen des Fensters steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration jedoch schnell wieder an. Ein gleichzeitiges Öffnen von Fenster und Türen ermöglicht einen sehr schnellen Ausgleich der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft, wie in Abbildung 44 am Morgen zu sehen ist.

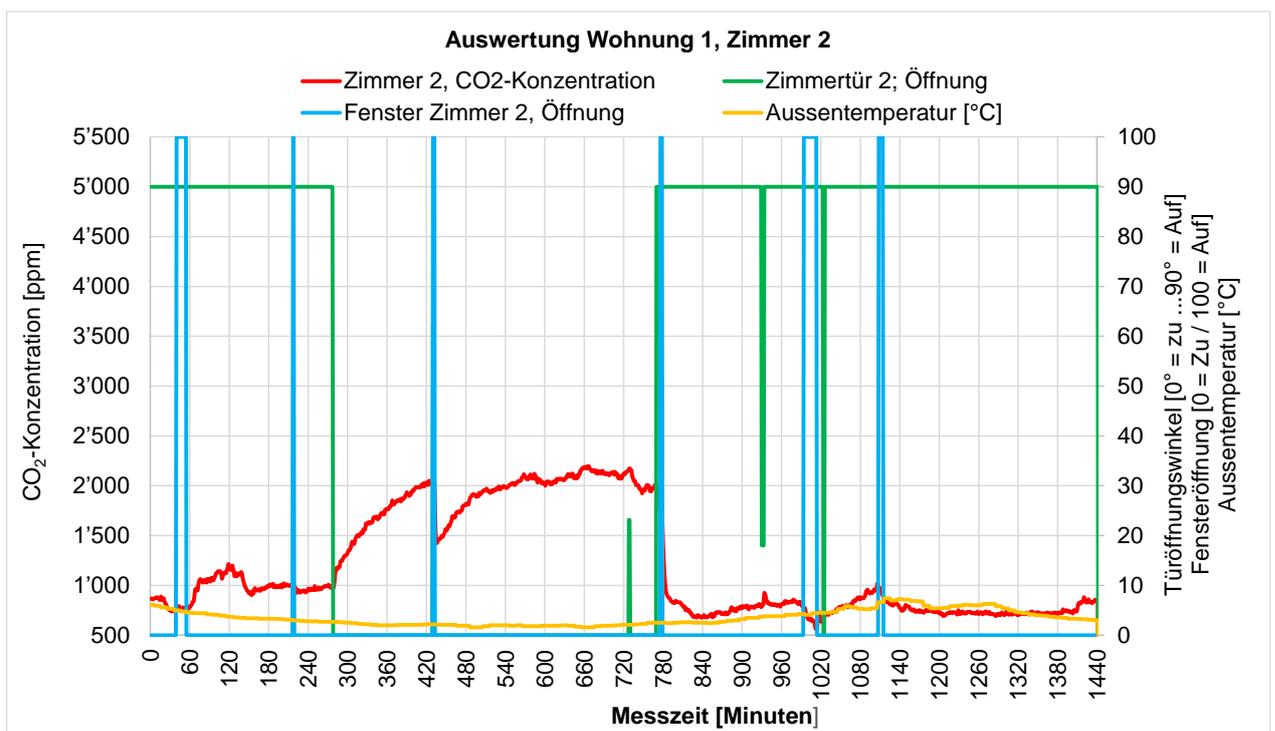


Abbildung 44: Wohnung 1; Zimmer 2; Nachtperiode mit kurzzeitiger Öffnung des Fensters

Auch kann während der Nacht ein kurzes Öffnen der Türe zu einem deutlichen Absinken der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft führen (nach ca. 220 min Messzeit). Wird die Türe danach nicht mehr ganz geschlossen, wie dies in Abbildung 45 zu sehen ist, sinkt die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer über den Verlauf der Nacht weiter leicht ab. In diesem Fall war die Schlafzimmertüre nach dem kurzzeitigen Öffnen den gesamten Rest der Nacht ca. 5 bis 10 cm weit offen.

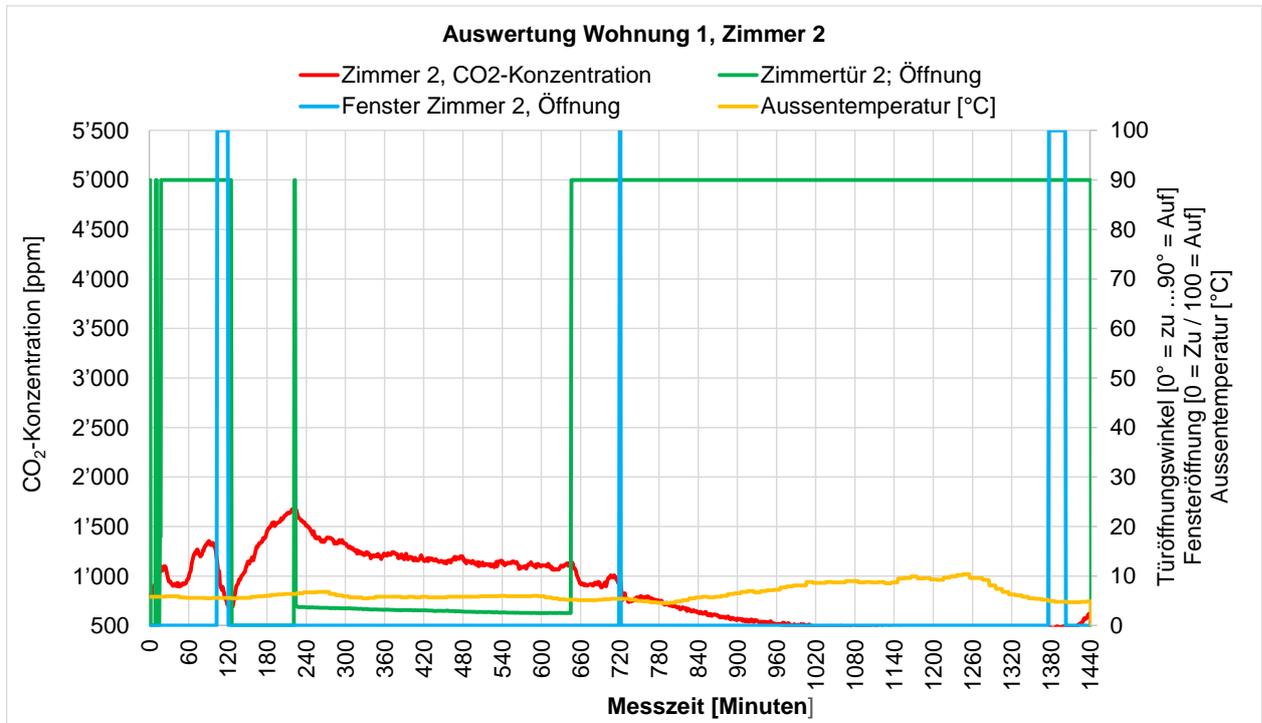


Abbildung 45: Wohnung 1; Zimmer 2; Nachtperiode mit leicht geöffneter Schlafzimmertüre

Wird der gesamte Messzeitraum betrachtet (Tag und Nacht), lassen sich bestimmte Muster erkennen und daraus ebenso Schlussfolgerungen für die einzelnen Räume ziehen. Wohnzimmer und Kinderzimmer befinden sich meistens unter 1000 [ppm]. Da zum Wohnzimmer keine Türe die Luftströmung behindern kann und zum Kinderzimmer die Türe oft offensteht (und eine geringe Belegung aufweist), ist dies gute erklärbar. Bei dem Schlafzimmer der Eltern hingegen ist die maximale CO<sub>2</sub>-Konzentration oft hoch, da dieses Zimmer die höchste Belegungsdichte aufweist und die Zimmertüre (v.A. nachts) meist geschlossen ist.

**Bemerkung:** Die Luft im Hauptschlafzimmer (Zimmer 1) wird von den Mietern als «schlecht» bezeichnet, wenn die Türe zu diesem geschlossen ist. Dies ist aufgrund der Messresultate entsprechender Nachtperioden nachvollziehbar. Im Weiteren wird die Effizienz der Dunstabzugshaube als unzureichend beschrieben. Dies kann zum einen mit dem hinter der Küchenkombination versteckten Abluftventil zusammenhängen, es ist aber wahrscheinlicher, dass dies durch einen beladenen Aktivkohlefilter verursacht wird (siehe Bemerkung zu Wohnung 2).

### **Auswertung für verschiedene Tür/Fensterstellungen:**

#### Vorgehen:

Weiterführende Auswertungen erfolgen jeweils separat für die Tag- und Nacht-Perioden. Generell wird die Nachtperiode von 22:00 Uhr abends bis um 06:00 Uhr morgens und die restliche Zeit als Tagesperiode definiert.

Weiter werden verschiedene Tür/Fensterstellungen für die Tag- und Nacht-Periode unterschieden:

- Tür offen (Mindestöffnung von 10%<sup>3</sup> wird als «offen» bewertet, geringere Öffnung als «zu»)
- Fenster offen (wenn Fensterkontakt ausgelöst, Öffnungsweite nicht bekannt)
- Fenster oder Tür offen
- Fenster und Tür geschlossen
- Gesamt

Da bei einer Tür- oder Fensteröffnung die Messwerte nicht zeitgleich stark absinken, wurde in der Datenauswertung der CO<sub>2</sub>-Messwerte eine Zeitspanne von 30 Minuten nach dem Schliessen von Fenster oder Türe der jeweiligen Kategorie («Fenster offen»/«Türe offen») zugeschlagen. Damit kann eine kurzzeitige Tür- oder Fensteröffnung besser beurteilt werden.

Um zu sehen welche Auswirkung die Häufigkeit einer Tür-/Fensteröffnung hat, wurden diese Daten pro Nacht ausgewertet (Öffnungshäufigkeit in % der Zeitdauer der Nacht) und mit der mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in dieser Nacht verglichen. Damit kann eine grobe Beurteilung der Wirksamkeit dieser Massnahme erfolgen.

#### Resultate und Erkenntnisse:

Die Betrachtung des Unterschieds zwischen den Messwerten in der Nacht und am Tag hat ergeben, dass am Tag keine auffallenden Überschreitungen des maximal zulässigen Wertes der CO<sub>2</sub>-Konzentration von 2000 ppm auftreten. Klar ersichtlich ist jedoch, dass bei geschlossenen Türen die Konzentration ansteigt, egal in welcher Zeitspanne.

Zu bedenken ist, dass die Anfangswerte in dem Intervall der Messung nach einer Öffnung eines Fensters und/oder einer Tür noch sehr hoch sind, bis sie sich ausgleichen. Diese Werte sind in der Analyse der Auswertung nicht ausgeschlossen worden. Um kurzzeitige Tür- oder Fensteröffnung sinnvoll zu beurteilen, wurde aber eine Zeitspanne von 30 Minuten nach dem Schliessen von Fenster oder Türe der jeweiligen Kategorie («Fenster offen»/«Türe offen») zugeschlagen.

Sieht man sich die Auswertung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen tagsüber an, fällt auf, dass Zimmer mit der Belegung von einer Person selbst bei geschlossenen Türen die Messwerte zum grössten Teil unter 2000 ppm liegen (Median bei 1620 [ppm]). Bei Zimmer 2 liegt der Median mit 1660 [ppm] nur leicht höher, aber es sind dennoch hohe Maximalwerte zu verzeichnen (bis zu 4000 [ppm]). Die hohen Werte resultieren wie zuvor erwähnt in den frühen Morgenstunden, wo die Türen geschlossen sind, die Konzentration noch hoch ist, da sie über Nacht ansteigen kann.

---

<sup>3</sup> Prozentzahl bezieht sich dabei auf den Öffnungsquerschnitt (10% entspricht ca. 6° Öffnungswinkel der Türe)

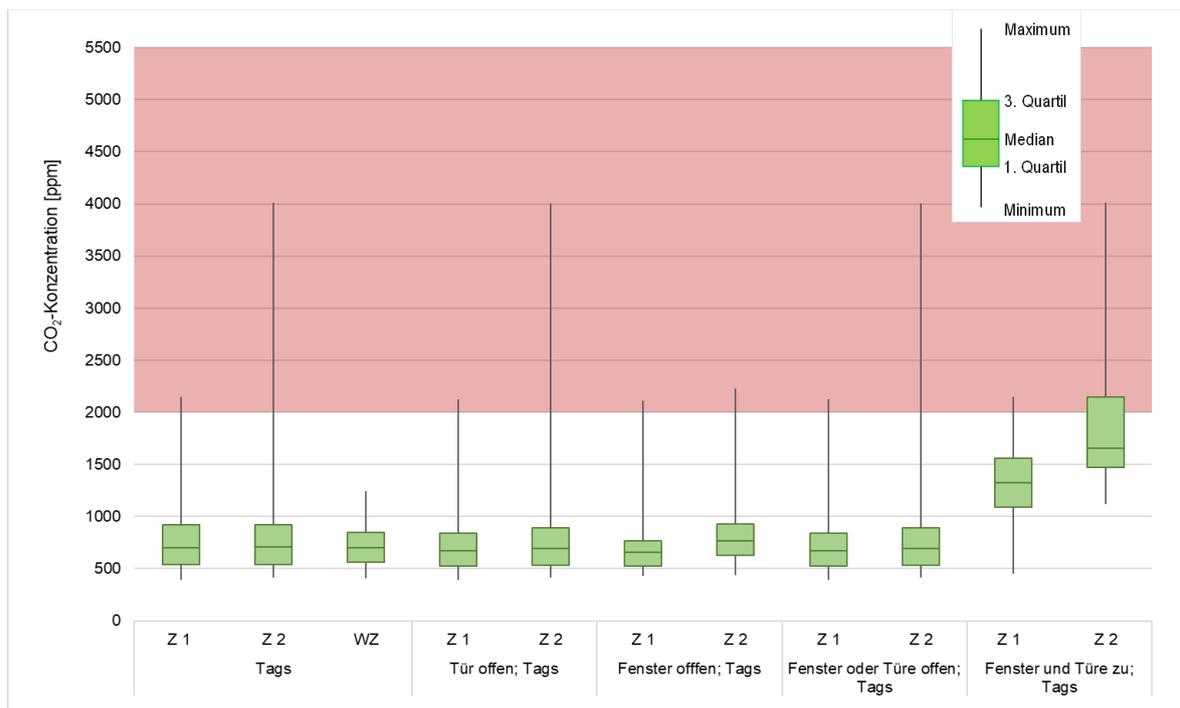


Abbildung 46: Minima, Maxima und Quartile der CO<sub>2</sub>-Messwerte am Tag (6:00-22:00); Wohnung 1

Sieht man sich die Werte für die Nacht im Gegensatz zum Tag an, fällt auf, dass die Messwerte tagsüber häufiger im mittleren Bereich und unter 1000 ppm liegen als in der Nacht. Abweichend ist hier vor allem Zimmer 2, das auch in der Tagesperiode sehr hohe maximale Werte aufweist. Diese Werte dürften insbesondere auf Morgenstunden (nach 06:00) zurückzuführen sein, in denen das Zimmer noch belegt war.

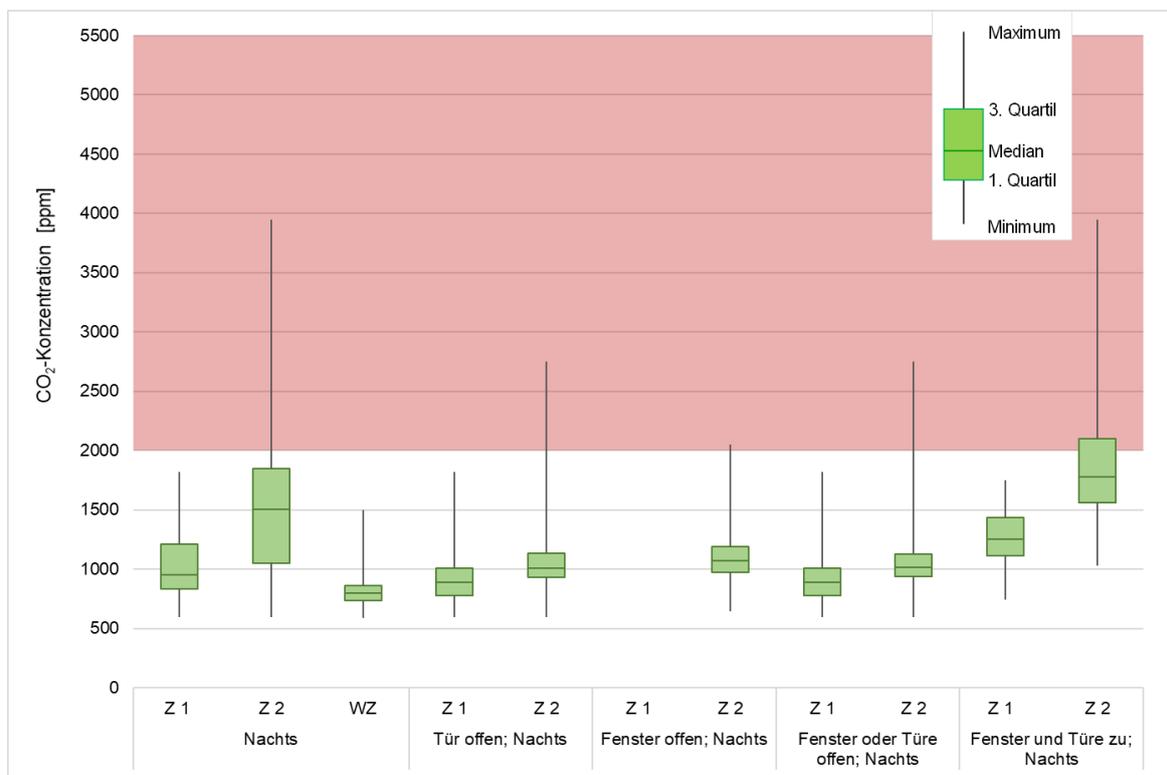


Abbildung 47: Minima, Maxima und Quartile der CO<sub>2</sub>-Messwerte in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 1

Im Zimmer 1 wurde nachts das Fenster nie geöffnet und dementsprechend bleibt diese Spalte leer. Aus den Auswertungen der Nachtperiode sind vor allem deutliche Differenzen zwischen Zimmer 1 und Zimmer 2 bei dem Fall «Fenster und Türe zu» ersichtlich. Diese Differenz dürfte in erster Linie durch die unterschiedliche Belegung der Zimmer zurückzuführen sein. Entsprechend ist dies auch in den sehr hohen maximalen Werten in Zimmer 2 zu sehen.

Mit einer weiteren Auswertung wird untersucht, mit welcher Häufigkeit gewisse Messwerte für die einzelnen Räume aufgezeichnet werden.

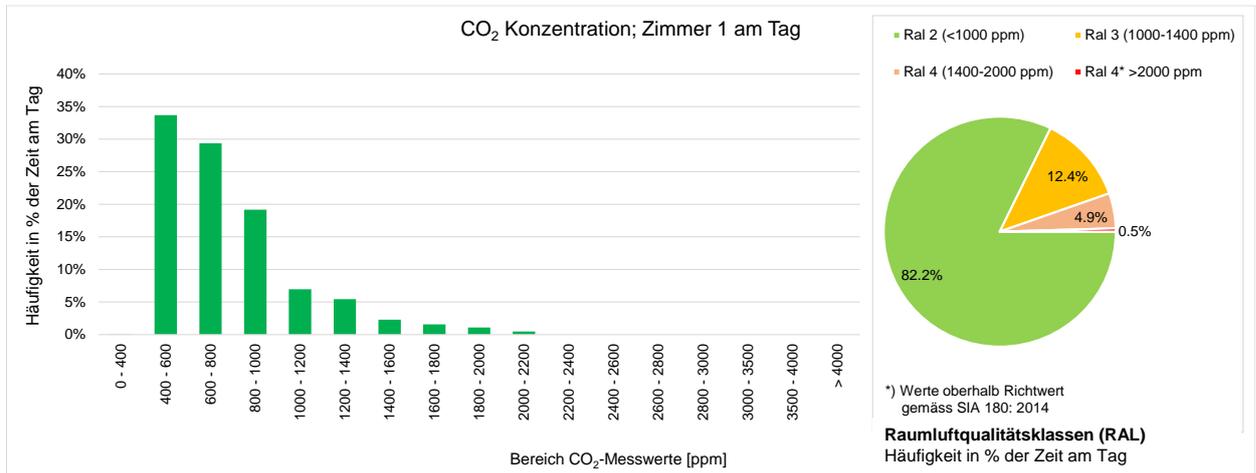


Abbildung 48: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 1, Zimmer 1

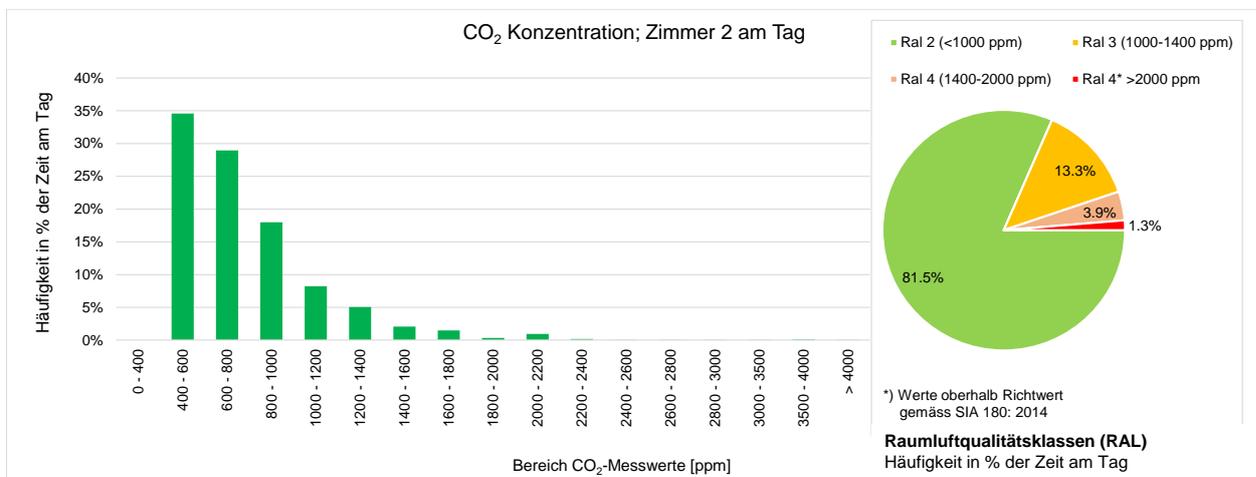


Abbildung 49: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 1, Zimmer 2

Am Tag lassen sich keine grossen Unterschiede zwischen den Zimmern feststellen, daraus kann man schliessen, dass entweder die Türen zum Grossteil offen oder die Zimmer nicht belegt waren.

Die hohen Werte am Tag, die beispielsweise dadurch entstehen, dass sich die Personen am Wochenende durchaus länger mit geschlossener Tür im Schlafzimmer aufhalten, führen zu den entsprechenden Häufigkeiten mit höherer Konzentration. Ersichtlich wird dies dann vor allem in der Auswertung der Tagesperiode, jedoch nicht in der Nachtperiode.

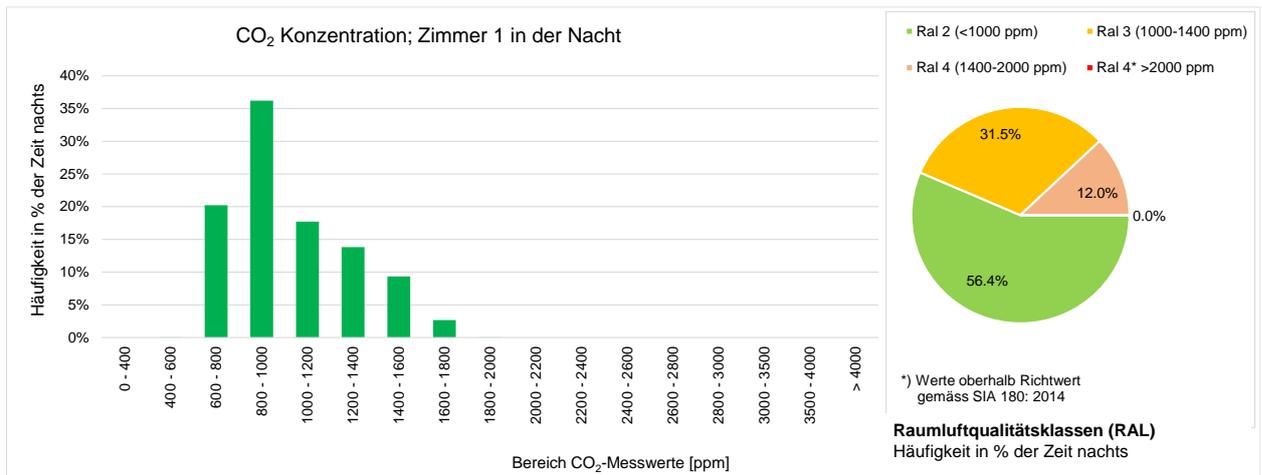


Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 1, Zimmer 1

In der Auswertung der Nachtperiode ist ein klarer Unterschied erkennbar in der Belegung und somit auch der Luftqualität. Bei Zimmer 1 liegen die Werte in der Nacht (unabhängig von der Fenster-/ Türöffnung) nie über 2000 ppm und nur während 12% der Zeit oberhalb 1400 ppm.

In Zimmer 2 dagegen liegen die Werte in der Nacht (unabhängig von der Fenster-/Türöffnung) während 18% der Zeit über 2000 ppm und während knapp 37% der Zeit oberhalb 1400 ppm. In der Regel sind die Personen in diesem Zimmer über eine Stunde in jeder Nacht einer Konzentration von mehr als 2000 ppm ausgesetzt.

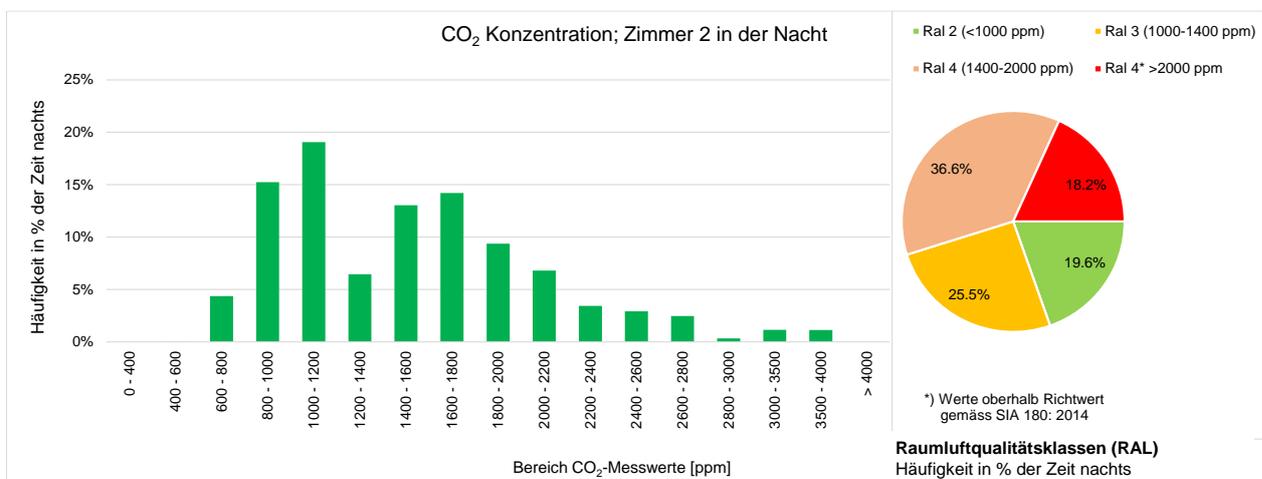
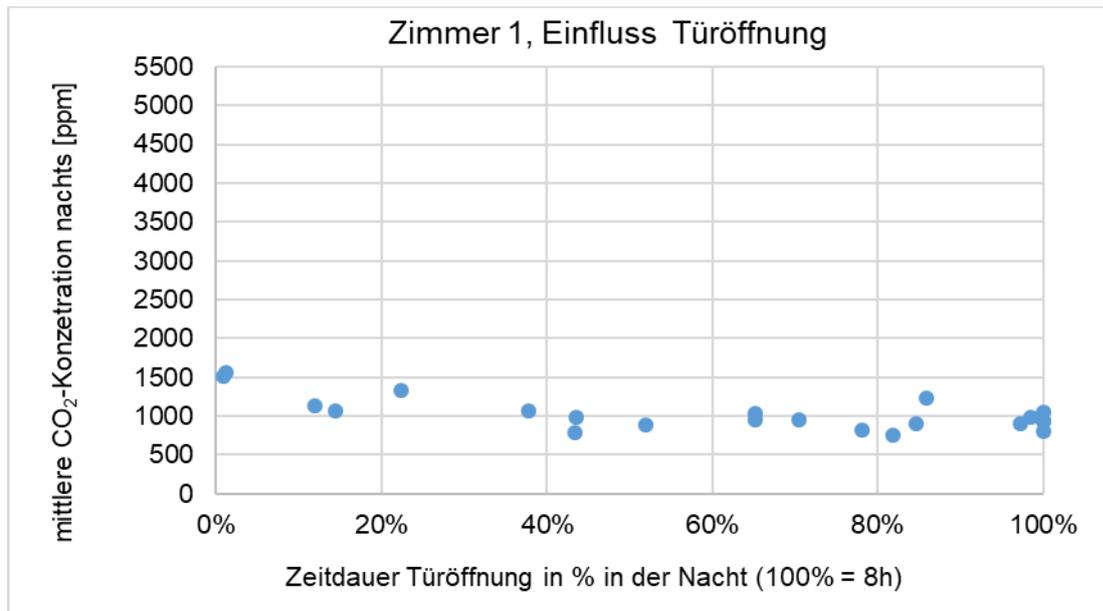


Abbildung 51: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 1, Zimmer 2

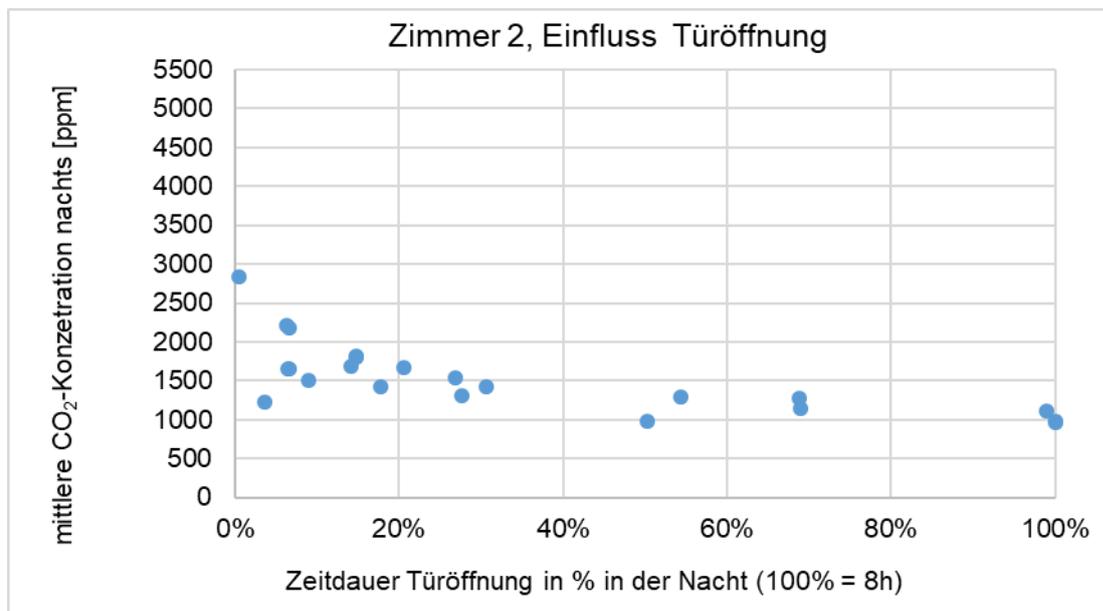
Der Öffnungswinkel und die Öffnungszeit der Türe steht meist in direktem Zusammenhang mit der Luftqualität im Raum, was im Folgenden aufgezeigt wird. Generell gilt also, je häufiger die Türe in der Nacht geöffnet wird, desto besser ist die Luftqualität.

Für die nachfolgenden Auswertungen wird ab einer Mindestöffnung der Türe von 10%<sup>4</sup> die Türe als «offen» bewertet. Bei einer geringeren Öffnung der Türe wird diese als «zu» bewertet.

<sup>4</sup> Prozentzahl bezieht sich dabei auf den Öffnungsquerschnitt (10% entspricht ca. 6° Öffnungswinkel der Türe)

Abbildung 52: Einfluss Türöffnung auf CO<sub>2</sub>-Konzentration; Wohnung 1, Zimmer 1

Ist die Türe fast die komplette Nacht mehr als 10% offen, so liegt die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration bei rund 1000 ppm. Ist die Türe jedoch fast immer geschlossen, so steigt die Konzentration in Zimmer 1 auf 1600 ppm an.

Abbildung 53: Einfluss Türöffnung auf CO<sub>2</sub>-Konzentration; Wohnung 1, Zimmer 1

Der gleiche Effekt ist auch in Zimmer 2 zu erkennen, jedoch mit deutlich höheren Mittelwerten bei geringer Öffnungsdauer, da sich hier mehr Personen aufhalten und die Konzentration generell höher ansteigen kann (In den gemessenen Nächten wurde ein Mittelwert von bis zu 3000 ppm erreicht).

Vergleicht man diese Messungen mit denen der Wohnung 2, fällt auf, dass die Häufigkeitsverteilung in Zusammenhang mit der Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht stehen muss. Um dies zu verdeutlichen, sind die folgenden Grafiken mit denen der Wohnung 2 zu vergleichen.

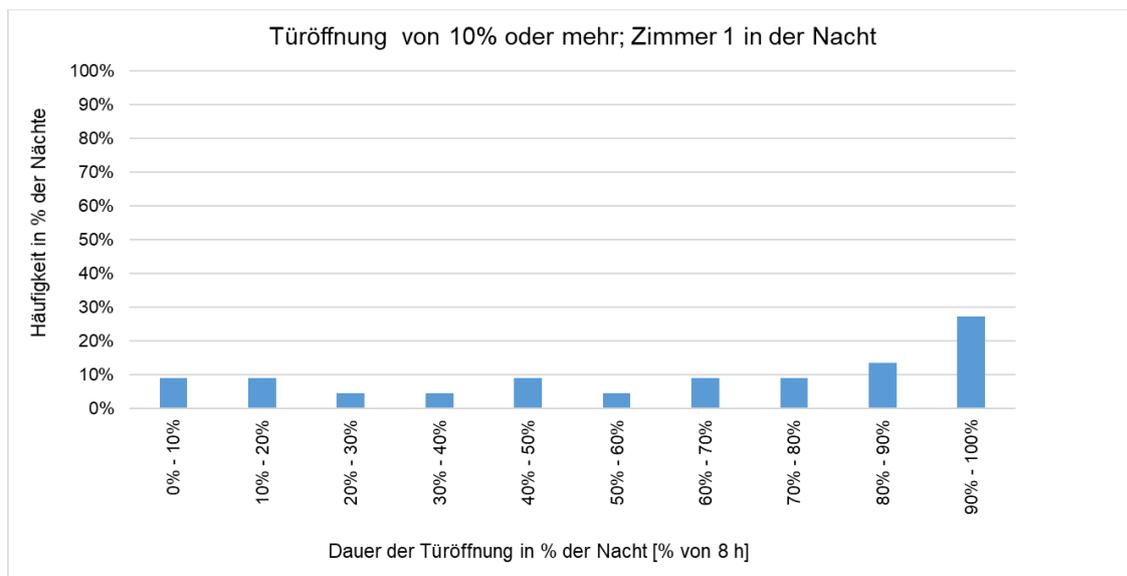


Abbildung 54: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00 – 6:00); Wohnung 1, Zimmer 1

Verständlicher werden mit der untenstehenden Abbildung zu Zimmer 2 die höheren Werte in diesem Zimmer. Die Häufigkeit einer Türöffnung ist geringer über die Nächte hinweg, wodurch ein mangelhafter Luftaustausch entsteht. Zudem ist die übliche Belegung in diesem Zimmer auch höher als in Zimmer 1.

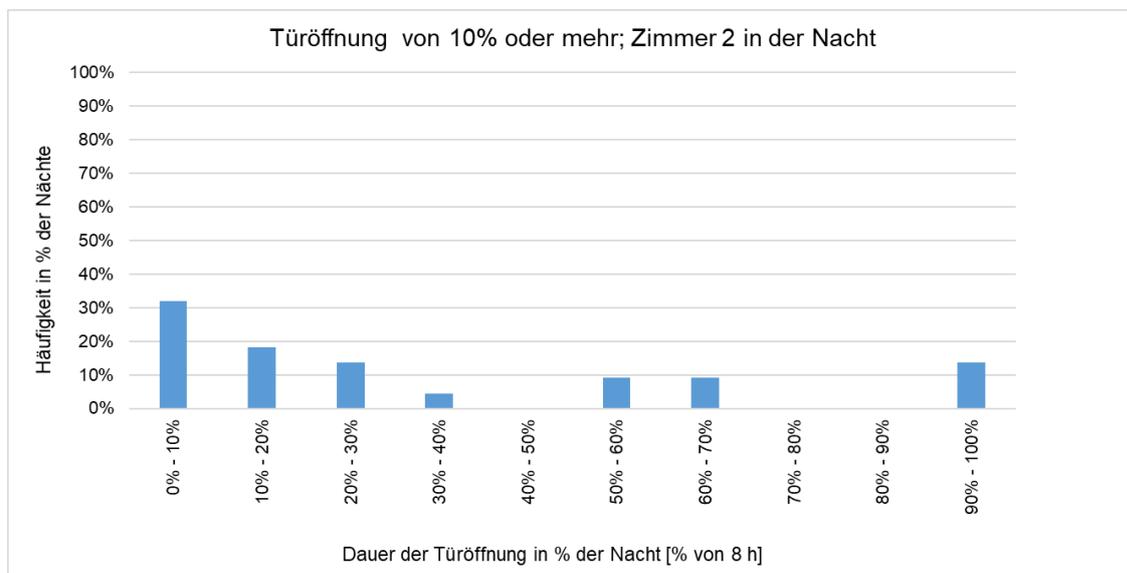


Abbildung 55: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00 – 6:00); Wohnung 1, Zimmer 2

In dieser Wohnung waren die Fenster nachts nur selten lange geöffnet<sup>5</sup>. In Zimmer 1 war das Fenster in keiner Nacht offen. In Zimmer 2 war das Fenster in gut 40% der Nächte geschlossen und nur in einer Nacht länger als 30 min offen (während ca. 4 h). Meistens wurde das Fenster nur kurz geöffnet (in gut 30% der Nächte weniger als 5 Min).

<sup>5</sup> Aus den Messdaten kann nicht unterschieden werden leichter und starker Öffnung des Fensters.

### 3.2.5 Messresultate und Erkenntnisse Wohnung 2

Die zweite Wohnung ist mit insgesamt vier Personen belegt. In der Messperiode war in dieser Wohnung nachts das Zimmer 1 von zwei erwachsenen Personen belegt und Zimmer 2 von zwei Kindern. Das Zimmer 3 war in der Messperiode nachts nicht belegt (tagsüber aber genutzt). Generell fällt auf, dass bei längerer Belegung der Zimmer die Konzentration stark ansteigt, da die Tür länger als normal über Nacht geschlossen bleibt. Hierbei kommt es zu Werten über 5000 [ppm] in beiden Schlafräumen (Zimmer 1 und Zimmer 2). Dies ist gut in Abbildung 56 zu sehen.

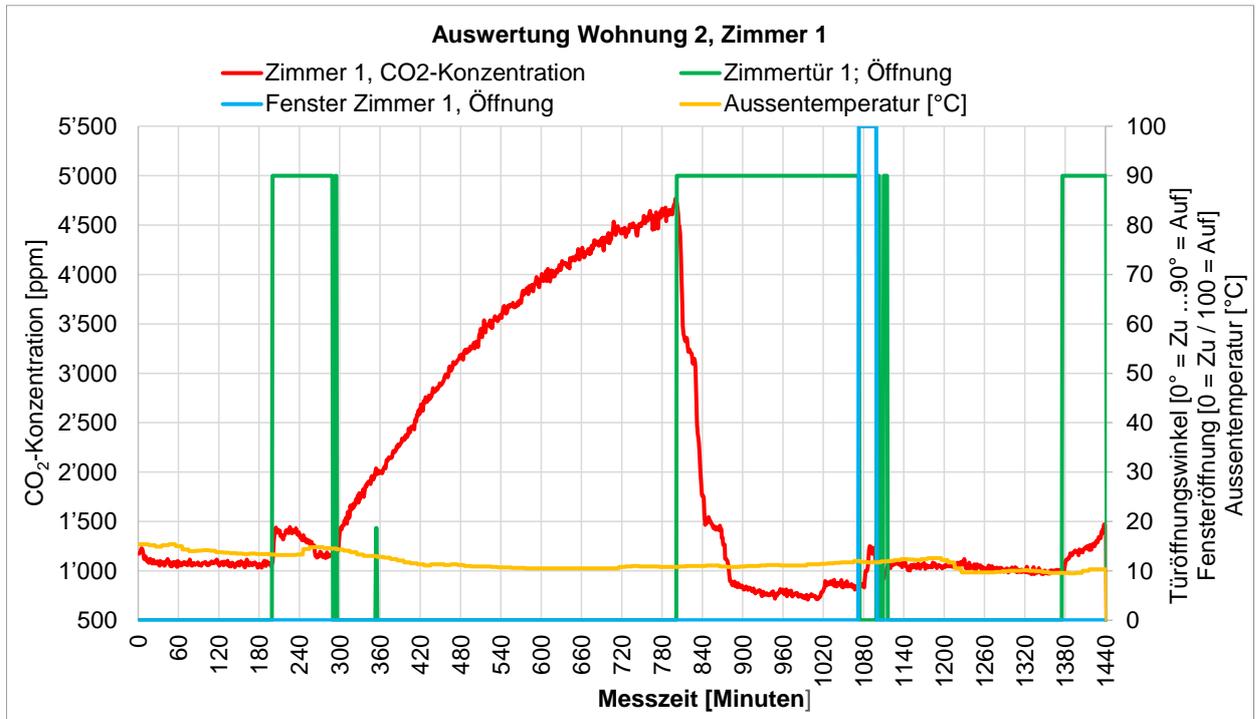


Abbildung 56: Wohnung 2; Zimmer 1; Nachtperiode ohne Fenster / Türöffnung

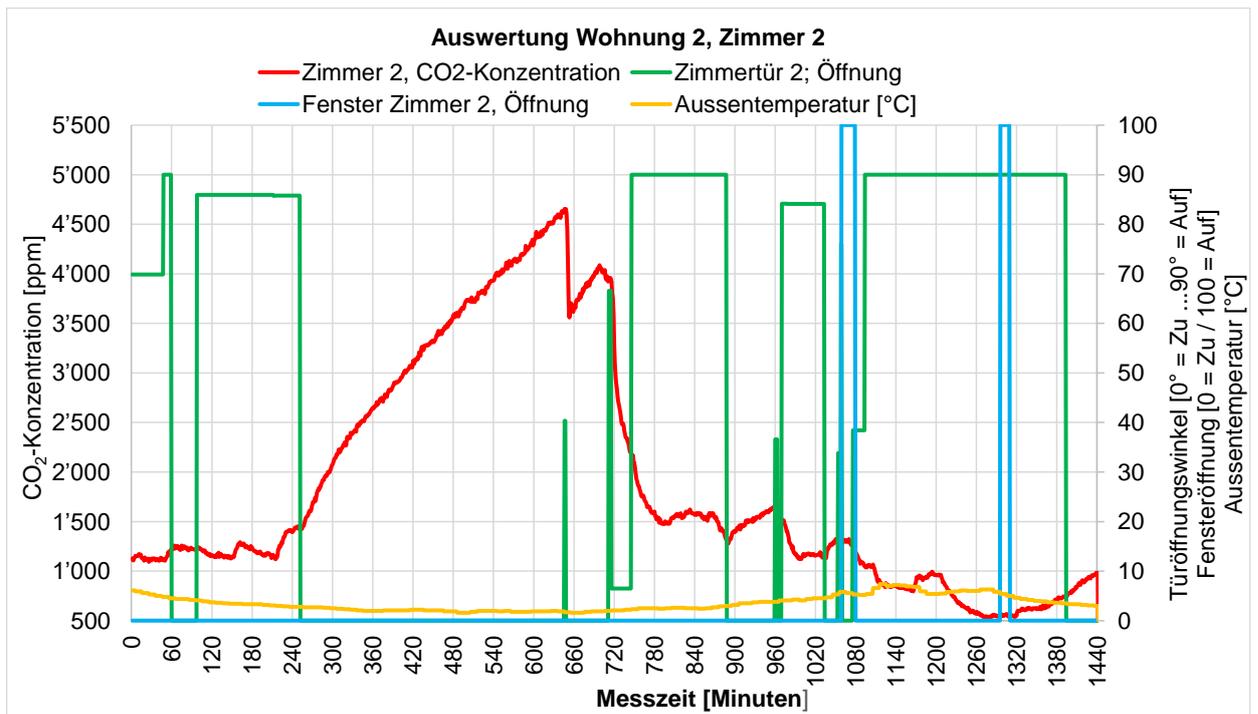


Abbildung 57: Wohnung 2; Zimmer 2; Nachtperiode mit kurzer Periode der Türöffnung

Wie in Abbildung 57 zu erkennen ist, bewirkt bereits eine kurze Öffnungszeit der Türe eine starke Reduktion der hohen CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer.

Erkennbar ist auch, dass das dritte Zimmer nachts nicht belegt ist, da sich hier eine vergleichbare CO<sub>2</sub>-Konzentration wie im Wohnzimmer einstellt. Allerdings sieht man in dieser Auswertung auch den Einfluss, den das Öffnen der Tür im Zimmer 2 mit hoher Konzentration auf andere Räume mit offenen Türen hat, wie dies der Verlauf in Zimmer 3 in derselben Nacht in Abbildung 58 zeigt. Der Konzentrationsanstieg tagsüber im dritten Zimmer ist auf die Belegung in dieser Zeit zurückzuführen.

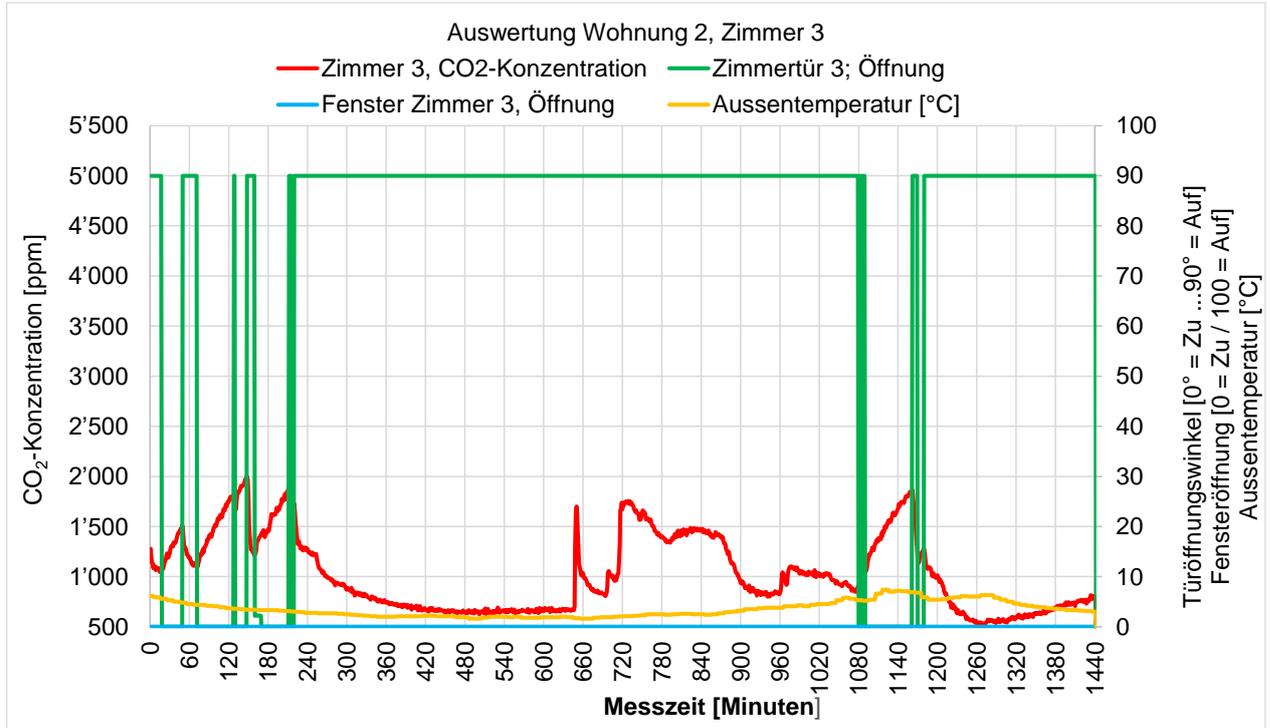


Abbildung 58: Wohnung 2; Zimmer 3; gleiche Nachtperiode für nicht belegtes Zimmer

Bei der Betrachtung der Häufigkeitsverteilungen der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen fällt ebenso wie bei Wohnung 1 auf, dass bei einer Belegung von mehr als einer Person bei geschlossener Tür und Fenster die Konzentration über Nacht stark ansteigt und am Morgen in den meisten Fällen über 5000 [ppm] liegt. In diversen Nächten wurden auch Anstiege über die Messgrenze (ca. 5400 ppm) des Datenloggers beobachtet. Zu beachten ist, dass die dargestellte Verteilung über alle Werte läuft. Wird nur der nächtliche Zeitraum bei geschlossener Türe ausgewertet, liegen fast alle Werte zwischen 2000 [ppm] und 5000 [ppm].

**Bemerkung:** Von den Mietern wurde beschrieben, dass sich Küchengerüche in Schlafzimmer ausbreiten, insbesondere wenn die Schlafzimmertüre geschlossen ist. Da es aufgrund der Strömungssituation in der Wohnung keine plausible Erklärung gibt, wurde empfohlen, den Aktivkohlefilter der Umlufthaube zu prüfen bzw. zu ersetzen. Dies erfolgte während der Messperiode und führte dazu, dass die Küchengerüche im Schlafzimmer danach nicht mehr als störend wahrgenommen wurden. Es zeigt sich damit auch in diesem Objekt, dass die Wartung der Aktivkohlefilter durch die Mieter kaum erfolgt.

### **Auswertung für verschiedene Tür/Fensterstellungen:**

#### Vorgehen:

Weiterführende Auswertungen erfolgen jeweils wie in Wohnung 1 separat für die Tag- und Nacht-Perioden. Generell wird die Nachtperiode von 22:00 Uhr abends bis um 06:00 Uhr morgens und die restliche Zeit als Tagesperiode definiert.

Weiter werden verschiedene Tür-/Fensterstellungen für die Tag- und Nacht-Periode unterschieden:

- Tür offen (Mindestöffnung von 10%<sup>6</sup> wird als «offen» bewertet, geringere Öffnung als «zu»)
- Fenster offen (wenn Fensterkontakt ausgelöst, Öffnungsweite nicht bekannt)
- Fenster oder Tür offen
- Fenster und Tür geschlossen
- Gesamt

Da bei einer Tür- oder Fensteröffnung die Messwerte nicht zeitgleich stark absinken, wurde in der Datenauswertung der CO<sub>2</sub>-Messwerte eine Zeitspanne von 30 Minuten nach dem Schliessen von Fenster oder Türe der jeweiligen Kategorie («Fenster offen»/«Türe offen») zugeschlagen. Damit kann eine kurzzeitige Tür- oder Fensteröffnung besser beurteilt werden.

Um zu sehen welche Auswirkung die Häufigkeit einer Tür-/Fensteröffnung hat, wurden diese Daten pro Nacht ausgewertet (Öffnungshäufigkeit in % der Zeitdauer der Nacht) und mit der mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in dieser Nacht verglichen. Damit kann eine grobe Beurteilung der Wirksamkeit dieser Massnahme erfolgen.

#### Resultate und Erkenntnisse:

Die Betrachtung des Unterschieds zwischen den Messwerten in der Nacht und am Tag hat ergeben, dass sich in dieser Wohnung deutliche Unterschiede in der Nutzung nachts und tagsüber ergeben. Auch hier ist ersichtlich, dass bei geschlossenen Türen die Konzentration ansteigt, egal in welcher Zeitspanne.

Auch hier ist zu berücksichtigen, dass die Anfangswerte in dem Intervall der Messung nach einer Öffnung eines Fensters und/oder einer Tür noch sehr hoch sind, bis sie sich ausgleichen. Diese Werte sind in der Analyse der Auswertung nicht ausgeschlossen worden. Um die kurzzeitige Tür- oder Fensteröffnung sinnvoll zu beurteilen, wurde aber eine Zeitspanne von 30 Minuten nach dem Schliessen von Fenster oder Türe der jeweiligen Kategorie («Fenster offen»/«Türe offen») zugeschlagen.

Am Tag sind die hohen Werte bei geschlossener Tür dadurch erklärbar, dass diese in den Morgenstunden (nach 6:00) entstehen, wenn die Konzentration noch auf einem hohen Level ist, aber diese Zeit in der Auswertung bereits zum «Tag» geschlagen wird.

Sieht man sich die Werte für die Nacht, im Gegensatz zum Tag an, fällt auf, dass die Messwerte tagsüber häufig im mittleren Bereich und unter 1000 ppm liegen. Abweichend davon ist vor allem Zimmer 3, das auch in der Tagesperiode mittlere Werte aufweist. Diese Werte dürften auf die Nutzung tagsüber bei geschlossener Zimmertüre und nur kurzen Fensteröffnungen zurückzuführen sein.

Nachts ist klar zu erkennen, dass die Werte bei geschlossener Tür nicht tolerierbar sind und die Mittelwerte sich auch über die ganze Nacht im Bereich >2000 ppm befinden. Nur eine längere Öffnung der Tür ist effektiv, auch ein kurzes Lüften mit dem Fenster ist nicht ausreichend.

Die tieferen Werte von Zimmer 3 sind auf die, gemäss der Aussage der Nutzer, fehlende Belegung nachts in der Untersuchungsperiode zurückzuführen. Gemäss diesen Angaben war in der Messperiode nachts das Zimmer 1 und Zimmer 2 mit 2 Personen belegt aber das Zimmer 3 nicht genutzt. Tagsüber wurde das Zimmer 3 dagegen genutzt.

---

<sup>6</sup> Prozentzahl bezieht sich dabei auf den Öffnungsquerschnitt (10% entspricht ca. 6° Öffnungswinkel der Türe)

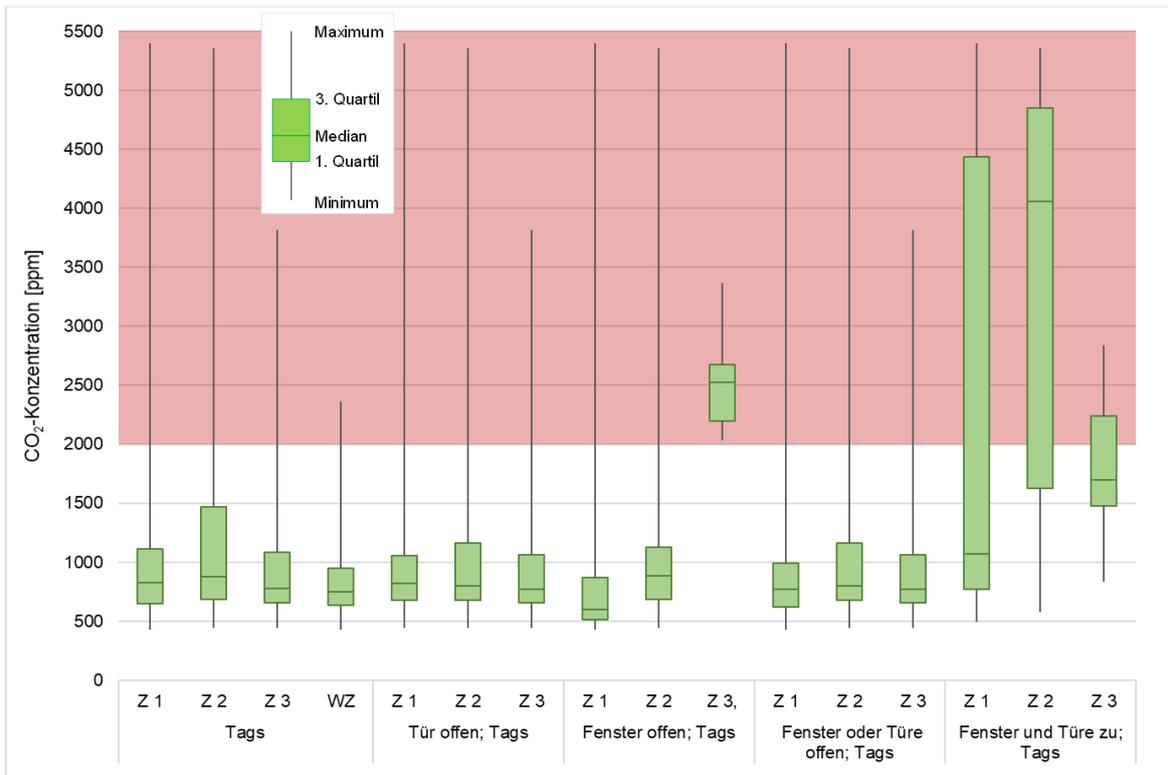


Abbildung 59: Minima, Maxima und Quartile der CO<sub>2</sub>-Messwerte am Tag (6:00-22:00); Wohnung 2

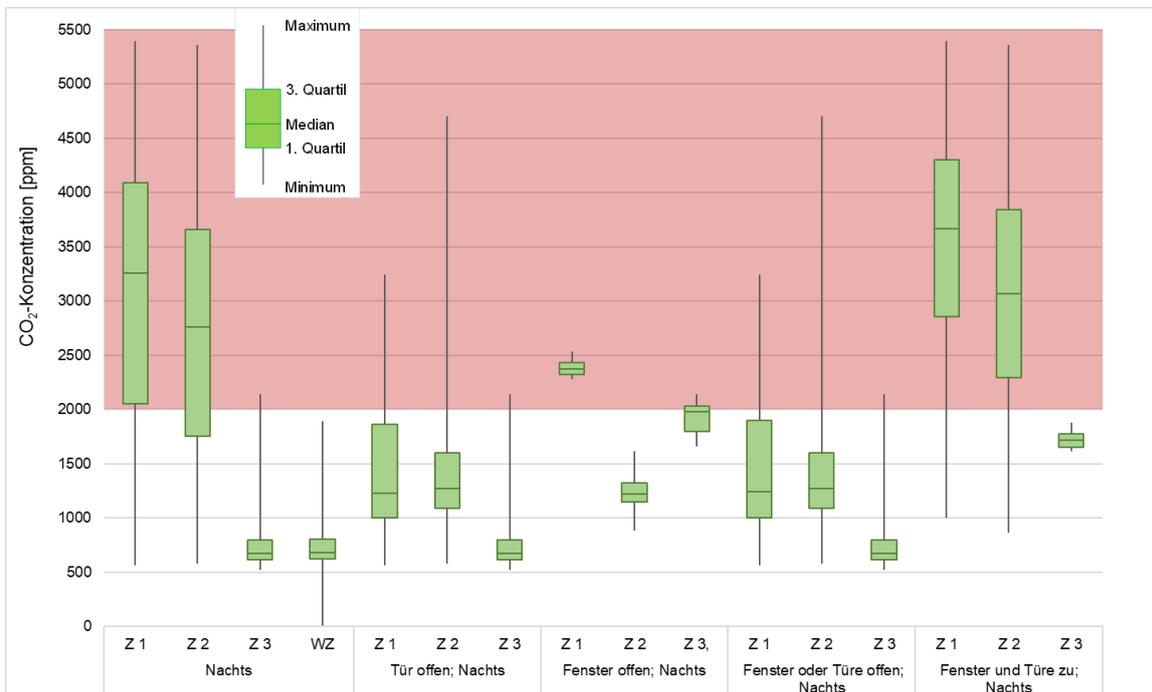


Abbildung 60: Minima, Maxima und Quartile der CO<sub>2</sub>-Messwerte in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 2

Betrachtet man nun zusätzlich noch die Häufigkeitsverteilung wird klar, dass der grösste Teil in der Nacht bei zu hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen verbracht wird, was mit einer dauernd geöffneten Tür verhindert werden könnte. Tagsüber ist Häufigkeit von CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über 2000 ppm viel geringer als in der

Nacht. Ein wesentlicher Anteil der hohen Messwerte in der Auswertung «am Tag» wird sich auf die Morgenstunden (nach 6:00) beziehen. In dieser Zeit ist eine Belegung der Zimmer mit geschlossenen Zimmertüren wahrscheinlich und würde diese hohen Messwerte erklären.

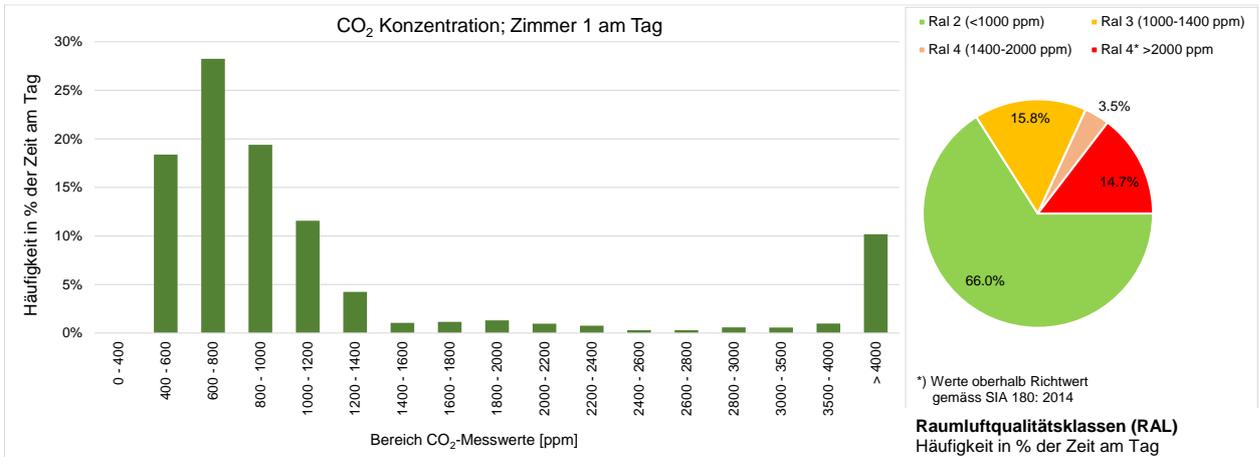


Abbildung 61: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 2, Zimmer 1

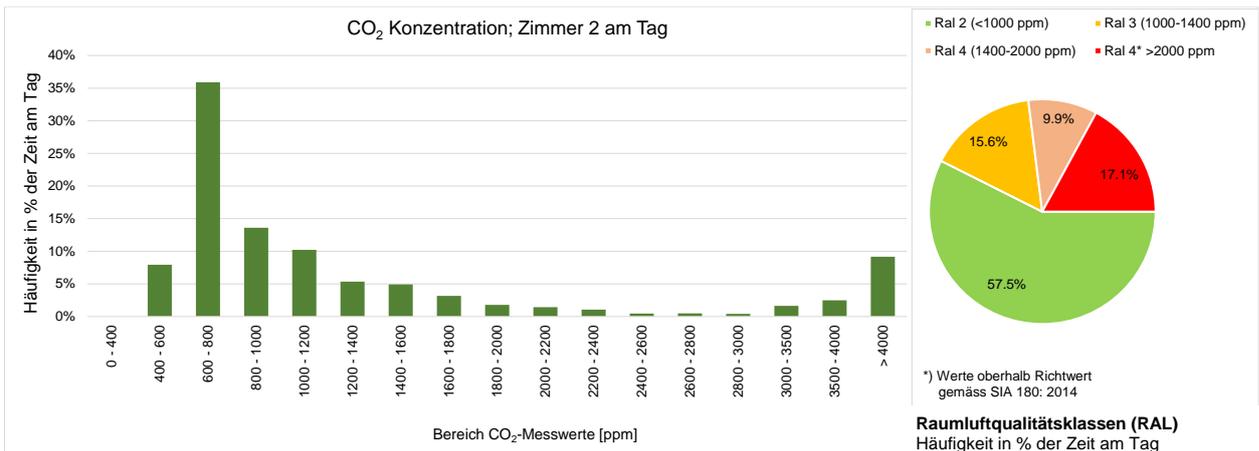


Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 2, Zimmer 2

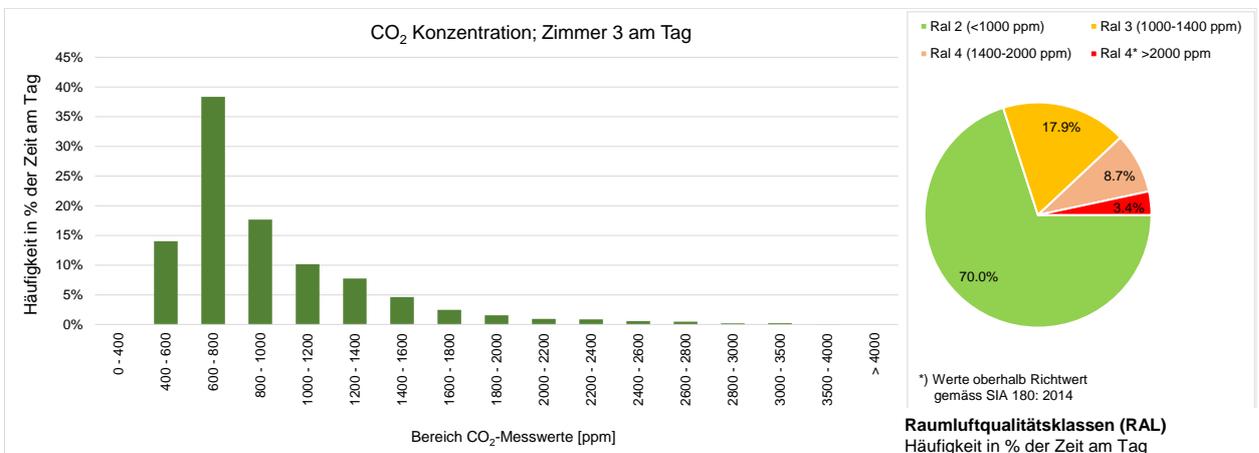


Abbildung 63: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 2, Zimmer 3

In der Auswertung der Nachtperiode ist ein klarer Unterschied erkennbar, der mit der Belegung und der Öffnung der Zimmertüre zusammenhängt. Daher liegen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Zimmer 1 und Zimmer 2 über einen Grossteil der Zeit nachts oberhalb 2000 ppm.

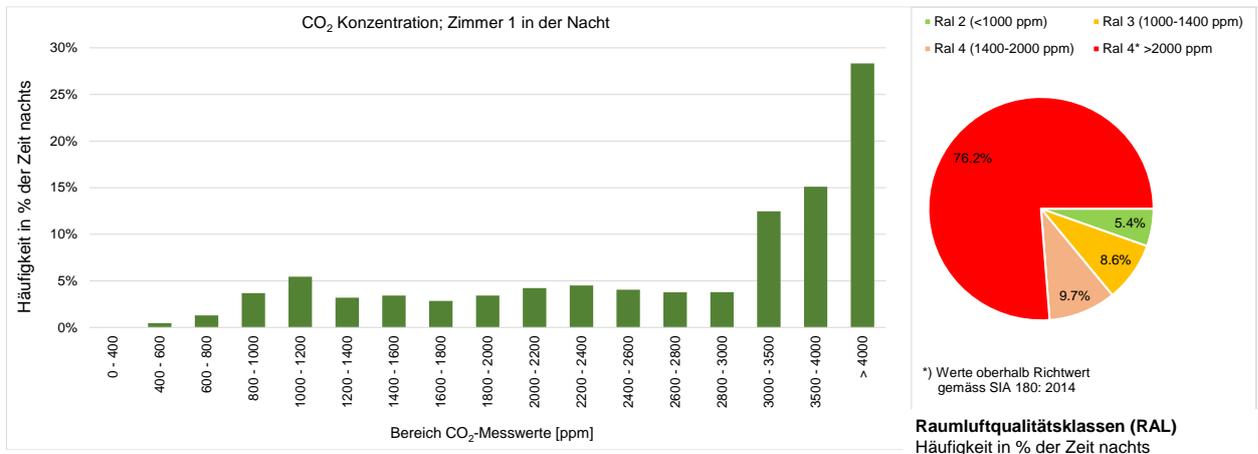


Abbildung 64: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 1

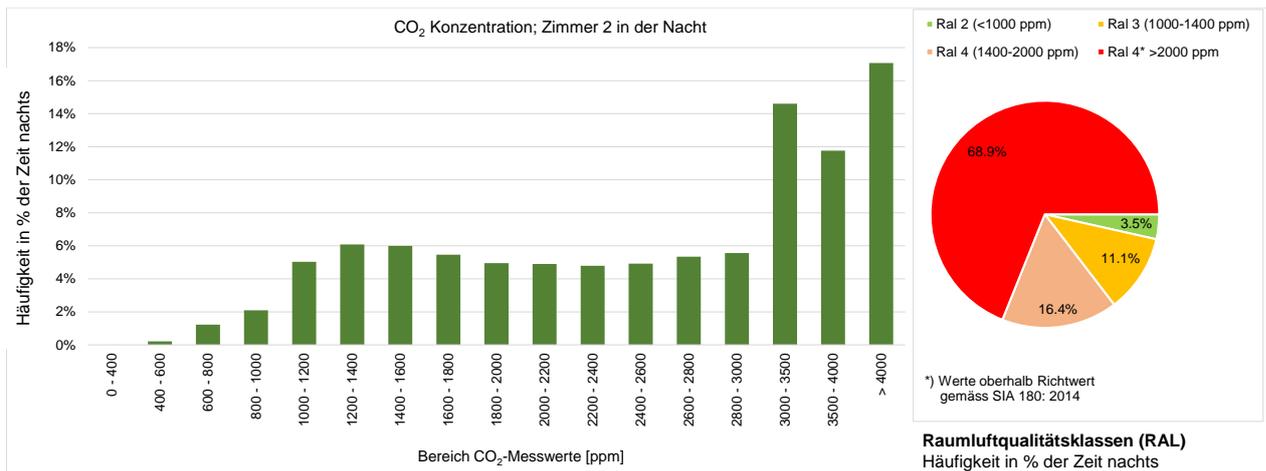


Abbildung 65: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 2

Es wird von einer durchgehenden Belegung von je 2 Personen in Zimmer 1 und Zimmer 2 ausgegangen. Die sehr hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Vergleich zu der Wohnung 1 begründen sich aus den Häufigkeiten der Türöffnungen pro Nacht.

Zimmer 2 ist fast identisch wie Zimmer 1, zeigt aber weniger häufig sehr hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (>4000 ppm). Insgesamt sind die Personen der beiden Schlafzimmer in jeder Nacht circa 6 von 8 Stunden einer zu hohen Konzentration ausgesetzt.

In Zimmer 3 ist der mittlere wie auch der Maximalwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration viel niedriger als in den anderen beiden Zimmern, da Zimmer 3 nachts nicht belegt und auch die Tür stets geöffnet ist.

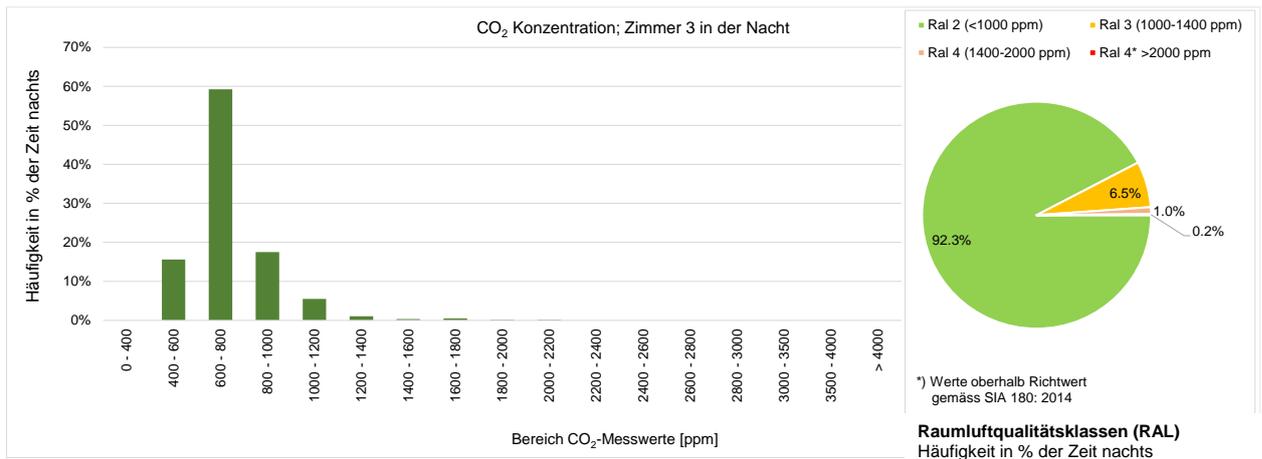


Abbildung 66: Häufigkeitsverteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 3

Der Öffnungswinkel und die Öffnungszeit der Türe steht meist in direktem Zusammenhang mit der Luftqualität im Raum, was im Folgenden aufgezeigt wird. Generell gilt also, je häufiger die Türe in der Nacht geöffnet wird, desto besser ist die Luftqualität.

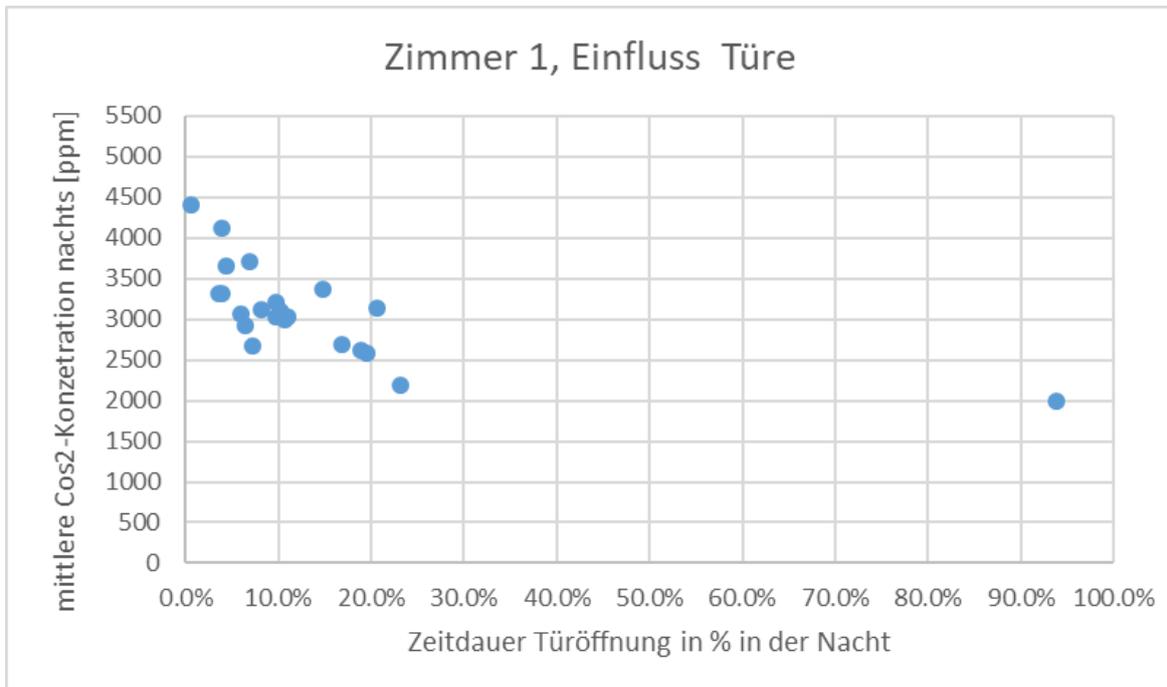


Abbildung 67: Einfluss Türöffnung auf CO<sub>2</sub>-Konzentration; Wohnung 2, Zimmer 1

Für die nachfolgenden Auswertungen wird ab einer Mindestöffnung der Türe von 10%<sup>7</sup> die Türe als «offen» bewertet. Bei einer geringeren Öffnung der Türe wird diese als «zu» bewertet.

Schnell lässt sich erkennen, dass die Türe hauptsächlich geschlossen ist, was zu den hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen führt. Der in Zimmer 1 abweichende Punkt bei 2000 ppm und rund 94% entsteht dadurch, dass die Türe nur 10% geöffnet war. Ein Austausch der Luft ist möglich und kann die Konzentration reduzieren. Wird der Verlauf noch genauer analysiert, stellt sich raus, dass nach der Nachtphase die Türe gegen sieben Uhr geschlossen wird und daraufhin die CO<sub>2</sub>-Konzentration wieder auf bis zu 4000 ppm

<sup>7</sup> Prozentzahl bezieht sich dabei auf den Öffnungsquerschnitt (10% entspricht ca. 6° Öffnungswinkel der Türe)

ansteigt, bis dann um circa 9 Uhr morgens Türe und Fenster geöffnet wurden. Der Verlauf dieser Nacht wird zur Erläuterung daher in Abbildung 68 dargestellt.

Der Effekt ist, dass bei längerer Türöffnung die mittlere  $\text{CO}_2$ -Konzentration abnimmt. Sowohl in Zimmer 1 wie auch in Zimmer 2 ist die Dauer der Türöffnung mit weniger als 2 h pro Nacht jedoch kurz und damit die hohen Mittelwerte der  $\text{CO}_2$ -Konzentration erklärbar. Zudem sind beide Zimmer in der Nacht mit 2 Personen belegt.

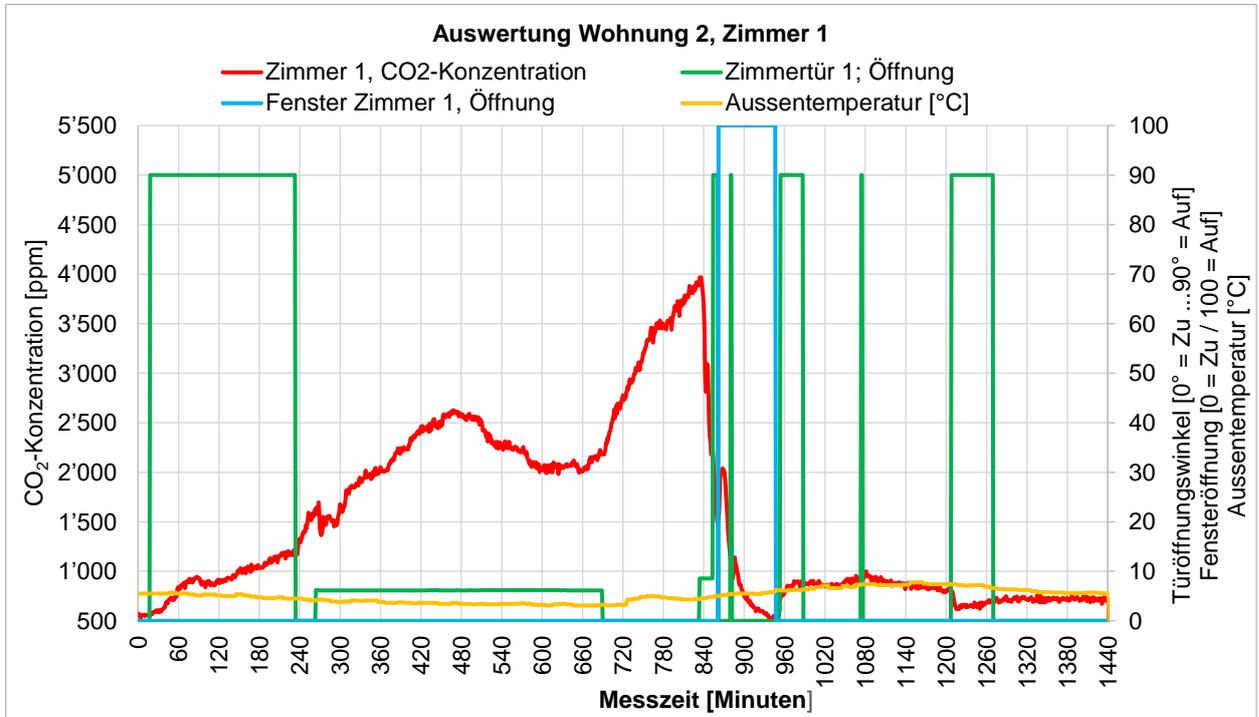


Abbildung 68: Wohnung 2; Zimmer 1; 24-h Periode mit langer Periode der geringen Türöffnung nachts (0 min = 19:00)

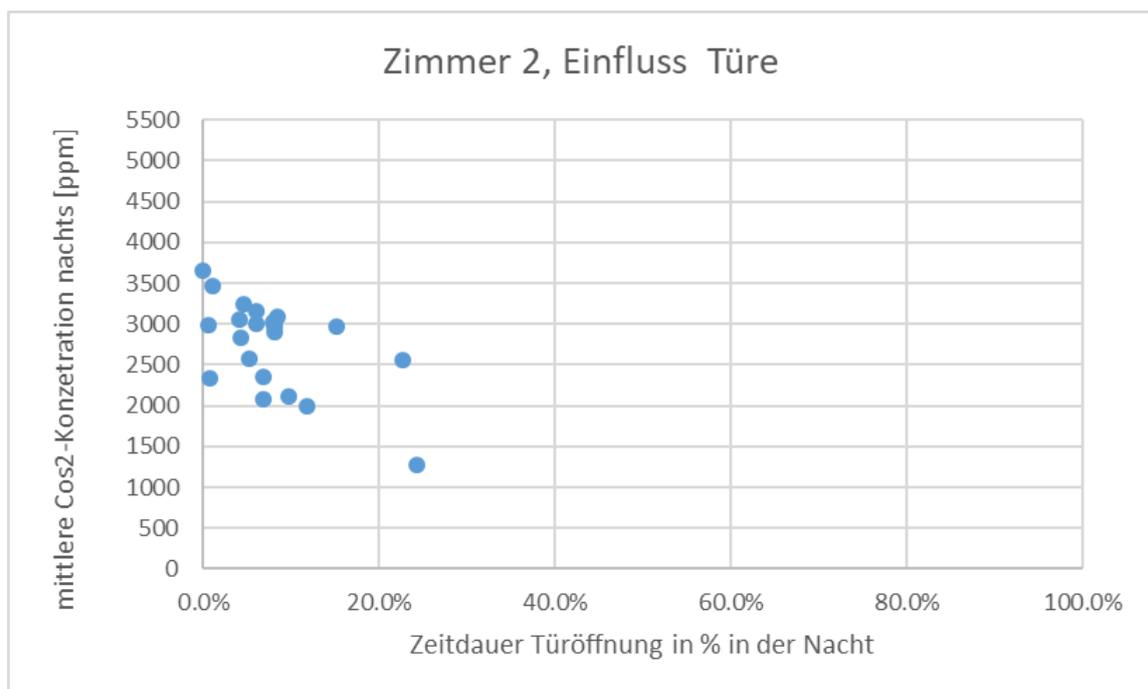


Abbildung 69: Einfluss Türöffnung auf  $\text{CO}_2$ -Konzentration; Wohnung 2, Zimmer 2

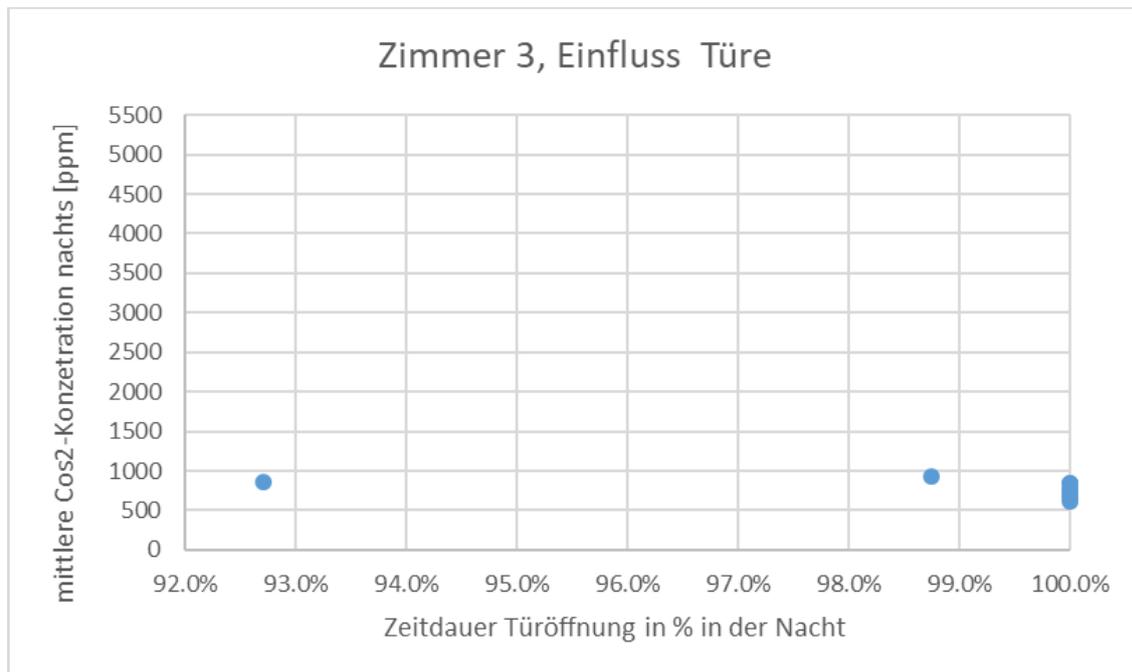


Abbildung 70: Einfluss Türöffnung auf CO<sub>2</sub>-Konzentration; Wohnung 2, Zimmer 3

Zimmer 3 steht im Gegensatz zu den beiden anderen Zimmern. Der Schwerpunkt der Häufigkeiten liegt hier auf fast immer geöffneten Türen und den entsprechend niedrigen Konzentrationen. Es ist aber auch anzumerken, dass dieses Zimmer gemäss den Nutzern während der Messperiode in der Nacht nicht belegt war.

Vergleicht man diese Messungen mit denen der Wohnung 1, fällt klar auf, dass die Häufigkeitsverteilung in Zusammenhang mit der Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht stehen muss. Zu erwähnen gilt, dass die Fenster in der kompletten Messperiode über die Nacht kaum je geöffnet wurden. Bei Zimmer drei war die Tür über den Messzeitraum nachts fast immer geöffnet.

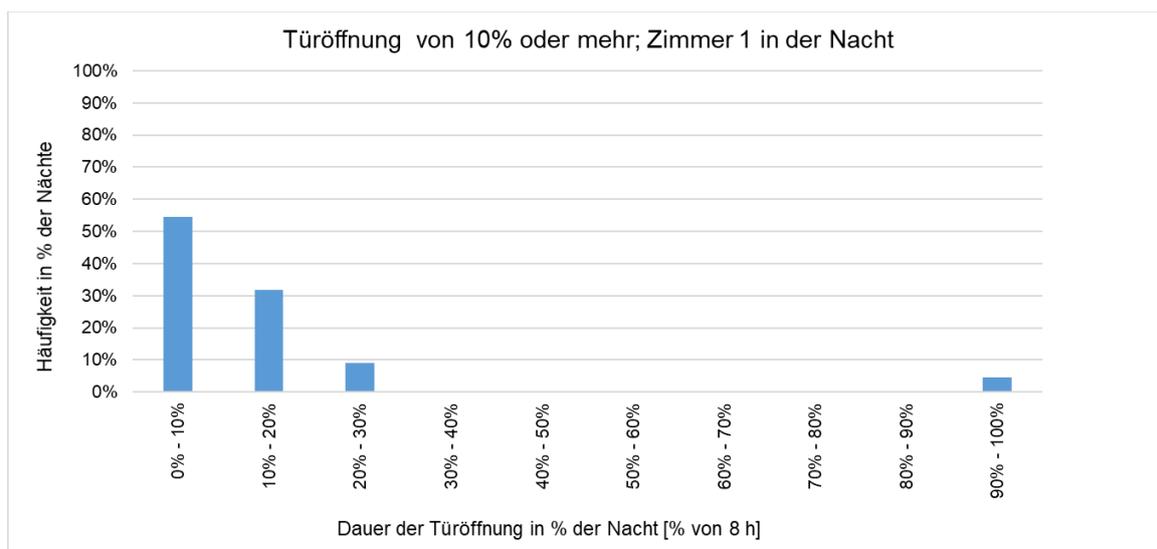


Abbildung 71: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 1

Für den in Zimmer 1 in Abbildung 71 andersfarbig gekennzeichneten Wert bei rund 94% Öffnungsdauer der Türe wird der zugehörige Verlauf in Abbildung 68 dargestellt.

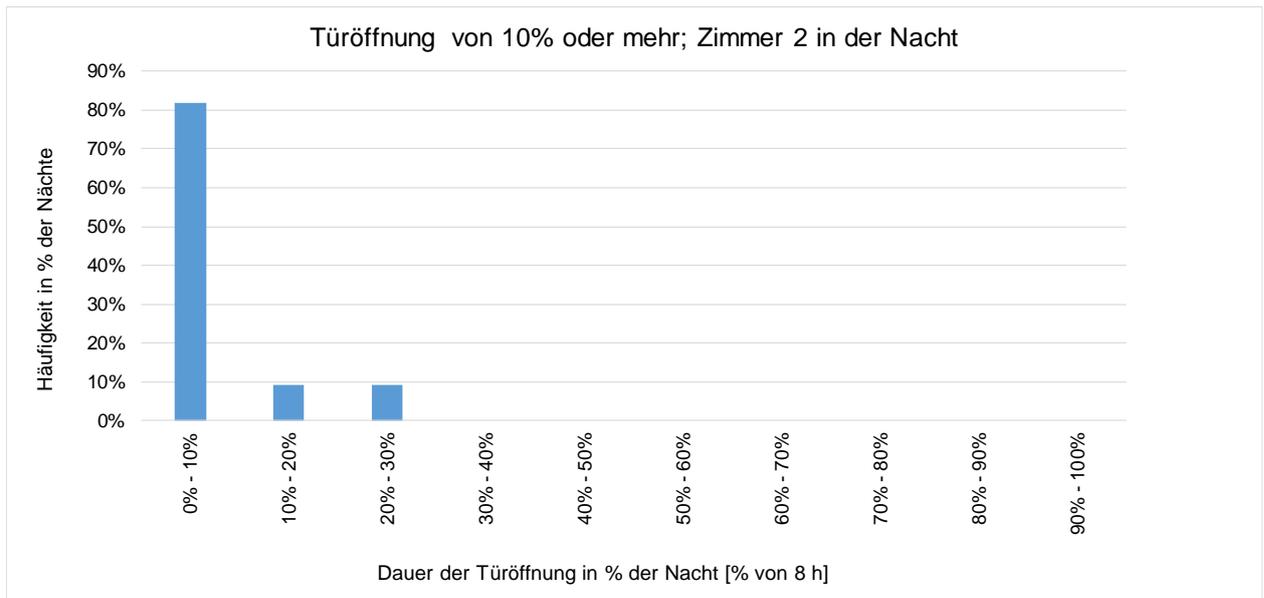


Abbildung 72: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 2

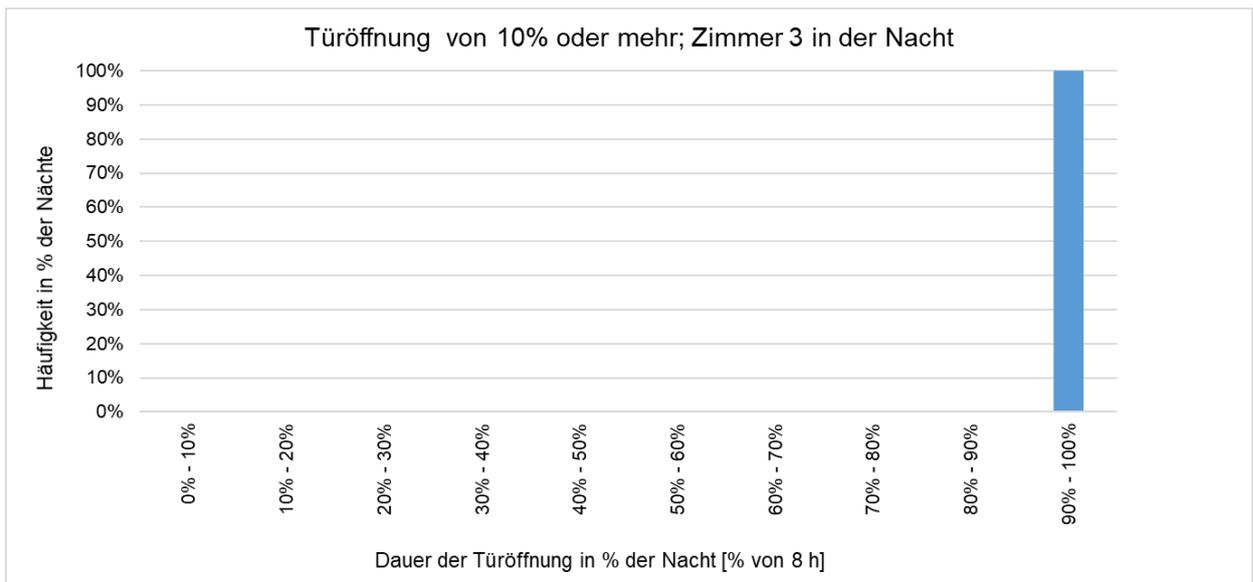


Abbildung 73: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 3

In dieser Wohnung waren die Fenster nachts fast nie geöffnet<sup>8</sup>. In Zimmer 1 war das Fenster nur in einer Nacht sehr kurz (1 min) offen. Auch in Zimmer 2 wurde das Fenster nur in 3 Nächten während max. 15 min geöffnet. In den übrigen Nächten war das Fenster immer geschlossen.

In Zimmer 3 war das Fenster nur in einer Nacht sehr kurz (7 min) offen.

<sup>8</sup> Aus den Messdaten kann nicht unterschieden werden zwischen leichter und starker Öffnung des Fensters.

### 3.3 Messungen in «ROTEG» Forschungswohnung

Da sich Messungen aus real genutzten Wohnungen nur schwer (bzw. gar nicht) für einen direkten Vergleich mit den Resultaten aus der Simulation eignen (aufgrund der vielen variablen Parametern), wären dafür Resultate aus einer «kontrollierten» Umgebung vorzuziehen. Dafür geeignet ist die Musterwohnung der TH Rosenheim (ROTEG; Rosenheimer Technologiezentrum Energie & Gebäude). In dieser Laborumgebung wurden auch verschiedene Untersuchungen mit aktiver Überströmung durchgeführt. Im Rahmen einer Projektarbeit an der TH Rosenheim wurden in der Forschungswohnung Messungen mit verschiedener Türöffnung und 2 «Personen» durchgeführt.

#### 3.3.1 Forschungswohnung

Die Forschungswohnung hat eine Grösse von 70m<sup>2</sup> mit 2 Zimmern, Bad, Küche und Gang. Die Forschungswohnung ist als Holzelementbau innerhalb einer Halle aufgebaut und kann mit der gewünschten Zu-/Abluftmenge betrieben werden. Für die Messungen wird die Zuluft an einer Stelle im Flur eingebracht und in der Küche und im Bad abgesaugt. Abbildung 74 zeigt den Grundriss der Wohnung. Für die Messungen wurde das grössere «Zimmer 2» aufgrund der dort vorhandenen Messausrüstung als Schlafzimmer gewählt. Das kleinere Zimmer (Zimmer 1) wird in der Messung als Wohnzimmer ohne Personenbelegung genutzt.

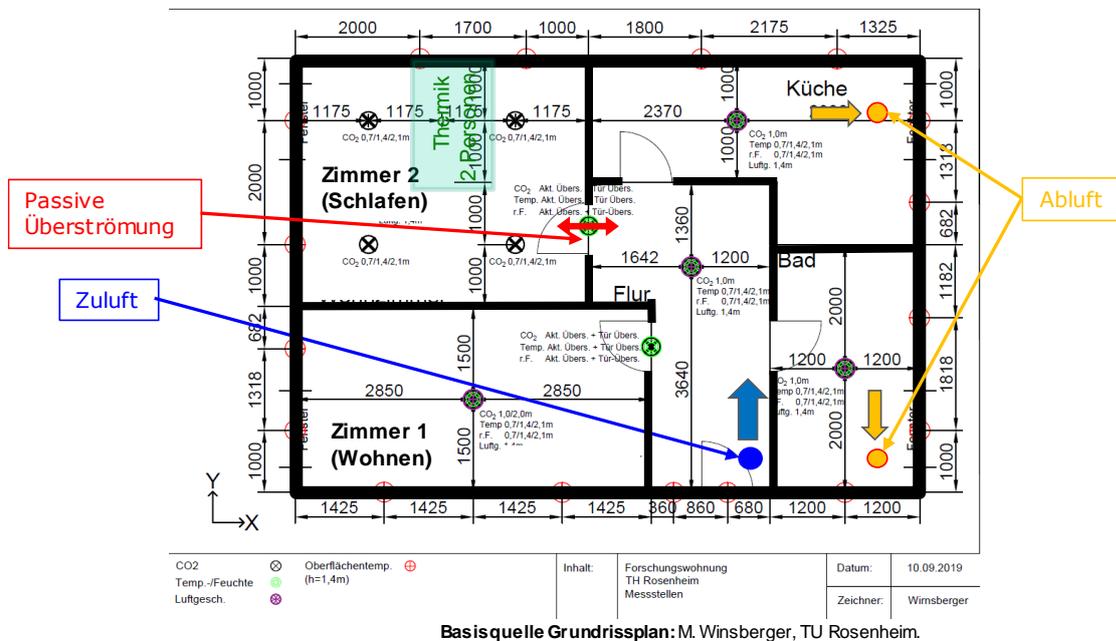


Abbildung 74: Grundriss «ROTEG» Forschungswohnung (Basis Bildquelle: M. Wirsberger, TU Rosenheim, 2019)

#### 3.3.2 Messkonzept

Im grösseren «Zimmer 2» werden zwei beheizte Dummies zur Simulation der Wärmeabgabe der Personen verwendet. Die beiden Dummies (1.1 m hoch, Durchmesser 0.3 m), sind während der Messungen auf zwei Schlaflieden mit den «Füssen» in Richtung Zwischenwand zum Zimmer 1 platziert. Im Zimmer 2 sind insgesamt zwölf CO<sub>2</sub>-Messstellen an vier Raumpositionen auf einer Höhe von 0.35 m, 1.4 m und 2.5 m vorhanden. Das CO<sub>2</sub> wird von CO<sub>2</sub>-Flasche (ausserhalb der WHG) über eine CO<sub>2</sub>-Massenstromregler (bis 193 l/h) über Schläuche in den Raum eingebracht. Um das durch die Expansion abgekühlte CO<sub>2</sub> wieder aufzuwärmen, werden die Schläuche inkl. kleiner 50mm Lüfter am Schlauchende im inneren, unteren Bereich der Tonnendummies angebracht. Dadurch sollte das CO<sub>2</sub> im Konvektionsstrom 'mitgerissen' werden und gut mit der Luft durchmischt werden. Weitere Randbedingungen der Messungen sind in Tabelle 3 dargestellt:

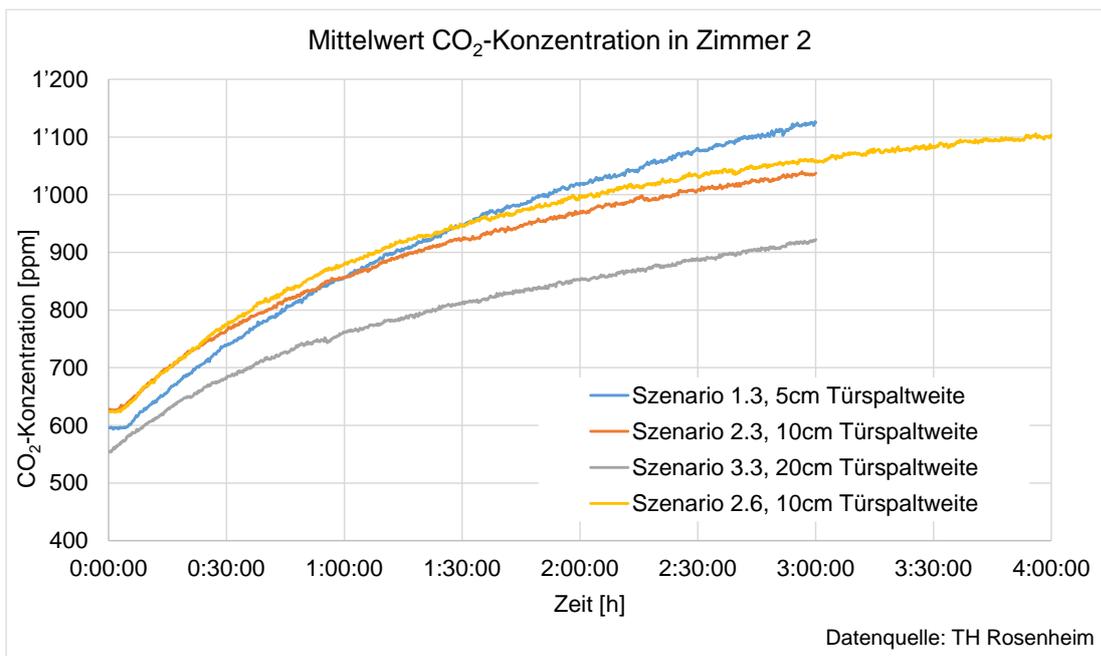
	Szenario 1.3	Szenario 2.3	Szenario 3.3	Szenario 2.6
<b>Türöffnungsgrad Zimmer 2</b>	<b>5 cm</b>	<b>10 cm</b>	<b>20 cm</b>	<b>10 cm</b>
<b>Dummy's</b>	2x liegend	2x liegend	2x liegend	2x liegend
<b>restliche Türen</b>	Küche: offen	Küche: offen	Küche: offen	Küche: offen
	Bad: geschlossen	Bad: geschlossen	Bad: geschlossen	Bad: geschlossen
	Zimmer 1: offen	Zimmer 1: offen	Zimmer 1: offen	Zimmer 1: offen
<b>Zuluft</b>	60 m <sup>3</sup> /h (Flur)	60 m <sup>3</sup> /h (Flur)	60 m <sup>3</sup> /h (Flur)	90 m <sup>3</sup> /h (Flur)
<b>Zulufttemperatur</b>	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C
<b>Abluft</b>	30 m <sup>3</sup> /h (Bad)	30 m <sup>3</sup> /h (Bad)	30 m <sup>3</sup> /h (Bad)	45 m <sup>3</sup> /h (Bad)
	30 m <sup>3</sup> /h (Küche)	30 m <sup>3</sup> /h (Küche)	30 m <sup>3</sup> /h (Küche)	45 m <sup>3</sup> /h (Küche)
<b>Sensible Wärmeabgabe gesamt</b>	110 W	110 W	110 W	110 W
<b>CO<sub>2</sub>-Abgabe gesamt</b>	24 l/h	24 l/h	24 l/h	24 l/h
<b>Messdauer</b>	3 h	3 h	3 h	4 h

Tabelle 3: Randbedingungen der Messungen in der «ROTEG» Forschungswohnung

Die in Tabelle 3 verwendete Bezeichnung der Szenarien wurde aus Tabelle 4 der Szenarien für die CFD-Simulation übernommen.

### 3.3.3 Messresultate und Erkenntnisse

In Abbildung 75 sind die Resultate für den mittleren Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Zimmer 2 für die vier Messszenarien dargestellt.

Abbildung 75: Messresultate mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration im Zimmer 2 über die Messzeit (Datenquelle: TH Rosenheim)

Wie zu erwarten, zeigt sich bei kleiner Öffnungsweite der Türe ein stärkerer Anstieg der Konzentration als bei stärker geöffneter Türe. Die Variante mit höherer Zuluftmenge (90 m<sup>3</sup>/h anstatt 60 m<sup>3</sup>/h) bei 10 cm Türöffnungsweite (Szenario 2.6) verzeichnet keine wesentliche Differenz im Verlauf. Eigentlich wäre ein geringerer Anstieg zu erwarten. Die Messung zeigte jedoch ein geringfügig stärkerer Anstieg, der aber innerhalb der Messunsicherheit der Geräte liegt und daher als vergleichbar bezeichnet werden kann.

Abbildung 76 zeigt die Resultate der Variante mit 5 cm Türöffnungsweite (Szenario 1.3). Dabei wird der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration als Differenz zum Startwert bei Messbeginn aufgetragen. Dabei wird neben dem Mittelwert aller zwölf Messsonden auch der Verlauf der Messsonde mit dem geringsten und höchsten Anstieg aufgetragen. Der geringste Anstieg ist auf der Höhe 0.35 m zu verzeichnen. Am geringsten ist der Anstieg im Messpunkt links unten (X = 4m, Y = 1.175m) im Zimmer 2 (siehe Abbildung 74). Der stärkste Anstieg ist in der Höhe von 1.4 m zu verzeichnen. Dabei sind nur geringe Differenzen zwischen den vier

verschiedenen Messstandorten vorhanden. Ebenfalls in 2.5 m Höhe ist ein stärkerer Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu verzeichnen. Allerdings meist leicht geringer als auf 1.4 m Höhe.

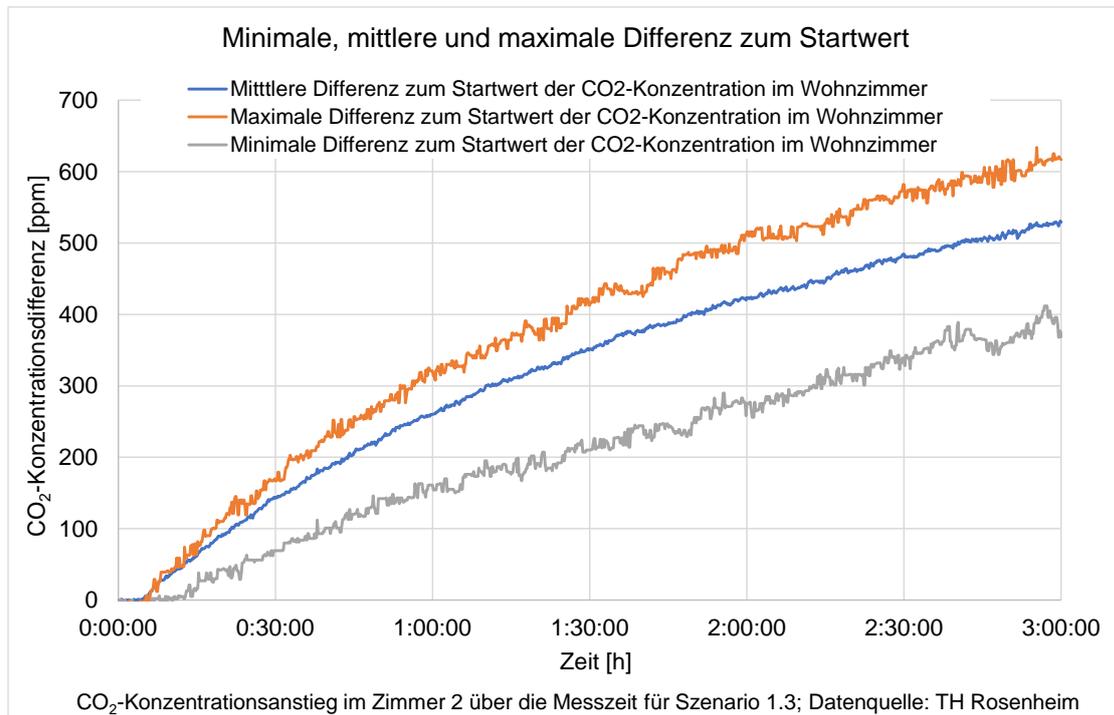


Abbildung 76: Messresultate minimaler, mittlerer und maximaler Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Zimmer 2, Szenario 1.3

## 4 Resultate Simulationen

### 4.1 Raummodell

Basierend auf den durchgeführten Abklärungen wurde es als zielführend erachtet, mit nur einem Raummodell zu arbeiten, dieses aber so aufzubauen, dass verschiedene Raumsituationen untersucht werden können (variables Modell). Der Vorschlag beinhaltet grob folgende Punkte:

- Basisgrundriss (Basismodell) entsprechend der Forschungswohnung TH Rosenheim, damit ein Vergleich mit den Messdaten aus der Forschungswohnung erfolgen kann.
- Die Variation der Einblas- und Absaugöffnungen (Standort) wird nicht untersucht, da deren Einfluss als gering angesehen wird. Es werden aber 2 verschiedene Zuluftvolumenströme untersucht, um deren Einfluss auf das Ergebnis zu verifizieren.
- Möglichkeit der Grundrissvariation (über ein «zuschaltbares» Zimmer), um den Einfluss einer anderen (ungünstigeren) Grundrissvariante untersuchen zu können.
- Möglichkeit der Variation der Überströmöffnung (div. Türöffnungen sowie Variante mit fester Überströmöffnung). Untersuchung des Einflusses auf das Ergebnis und wo möglich Vergleich mit Messresultaten aus der Forschungswohnung.
- Variation der Personenanwesenheit durch Berechnungsvariante mit 1 oder 2 schlafender Personen.

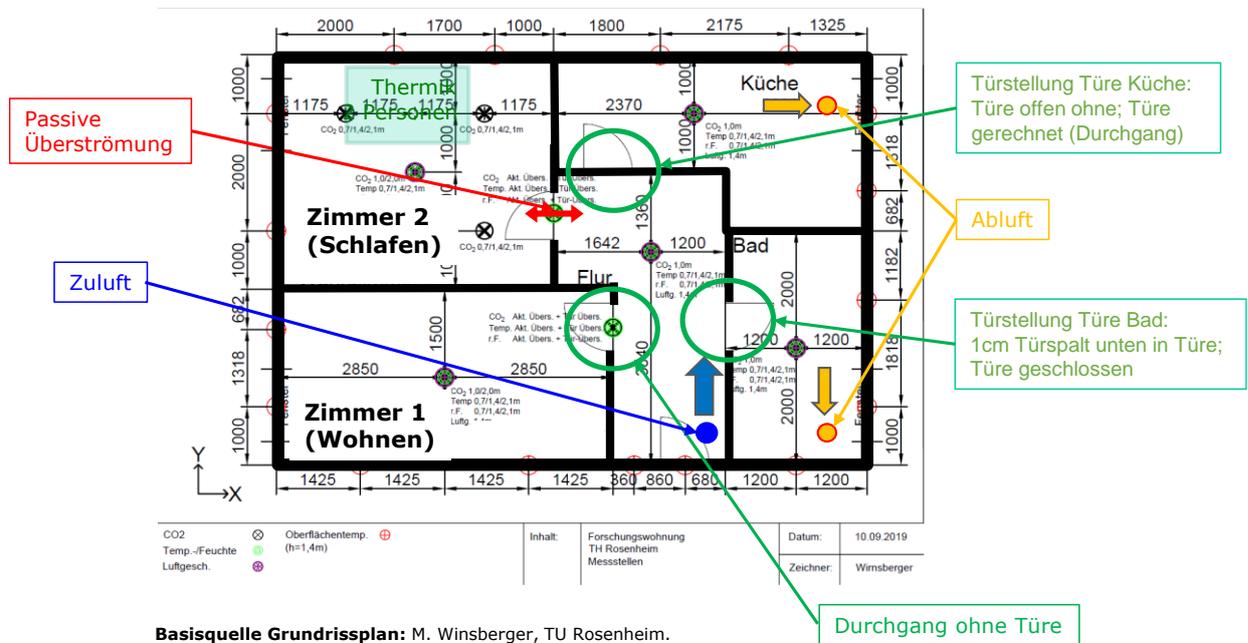


Abbildung 77: Modellvariante basierend auf dem Grundriss der Forschungswohnung ROTEG

#### 4.1.1 Abgleich Messaufbau ROTEG-Forschungswohnung mit «Design» der Simulationen

Simulation auch im «Wohnzimmer»: Um Vergleiche zwischen der Messung und der Simulation zu ermöglichen, wird vorgeschlagen auch für die Simulationen das «Wohnzimmer» als Basis für die Betrachtungen «Schlafzimmer» festzulegen (gleiche Grundrisse).

Einschätzung: Aufgrund der Pläne ist keine wesentlich andere Situation zu erwarten, da die Zimmertüre auch an den Durchströmbereich grenzt. Der Raum ist nur geringfügig grösser 18.8 [m<sup>2</sup>] anstatt 17.7 [m<sup>2</sup>]. Im Vergleich zu «typischen» Schlafzimmern ist auch das originale «Schlafzimmer» eher gross. Dies dürfte sich nur in einem leicht verzögerten Anstieg der Raumluftkonzentration zeigen.

Da in diesem Raum in der Forschungswohnung an 4 Stellen CO<sub>2</sub> gemessen wird, werden die Resultate der Messungen sicher aussagekräftiger, insbesondere was allfällige Konzentrations-unterschiede betrifft. Daher ist es sinnvoll die Simulation auf dem gleichen Raum zu basieren.

## 4.2 Randbedingungen

Bezüglich der Randbedingungen sind folgende Parameter wesentlich und müssen in einem nächsten Schritt festgelegt werden:

#### **Temperaturdifferenz zwischen den Räumen:**

Die Temperaturdifferenz ist ein wesentlicher «Antriebsfaktor» und muss daher adäquat in die Berechnung einbezogen werden. Als Startbedingung der Simulation wird von einer ausgeglichenen Temperatur in allen Räumen ausgegangen (ungünstiger Fall). Im Laufe der Simulation wird sich eine Temperaturdifferenz zwischen den Räumen einstellen (durch Personen/interne Lasten).

#### **Temperaturdifferenz zwischen Raum und Aussen (Oberflächentemperatur):**

Auch diese Temperaturdifferenz ist ein wesentlicher «Antriebsfaktor» und ist überwiegend von den Aussenbedingungen abgängig. Für die Basisszenarien wird von einer isothermen Situation ausgegangen (Innen- = Aussentemperatur).

#### **Druckdifferenzen innerhalb der Wohnung:**

Druckdifferenzen können den Luftaustausch wesentlich beeinflussen. Für die Simulation wird von einem ungünstigen Fall (Windstille und möglichst dichter Gebäudehülle) ausgegangen.

#### **Thermik von Personen und allenfalls Geräten:**

Schlafende Personen aber auch Geräte führen zu einer Thermik im Raum, was den Luftaustausch fördert. Daher sind die Festlegungen dazu relevant für die Simulation. Daher wird dieser Parameter in der Berechnung variiert (1 oder 2 Person vorhanden). In ausgewählten Szenarien wird zusätzlich mit einer internen Last im Schlafzimmer gerechnet.

#### **Überströmelemente:**

Für die Simulation muss festgelegt werden, welche Varianten der Überströmöffnung untersucht werden soll. Für die Simulation wurden zuerst Türöffnungsweiten von 5 und 10 cm untersucht. Auf die Berechnung der Türspaltweite 20 cm wurde aufgrund der Resultate bei 5 und 10 cm verzichtet. Die Option eines Überströmelementes wurde auf Basis der Resultate der Messungen in der Testwohnung untersucht. Dazu wurden weiteren Abklärungen zu geeigneten (in ähnlicher Art) bereits am Markt erhältlichen Elementen durchgeführt. Aus den verfügbaren Daten müsste ein Element für einen Luftaustausch mit konvektivem Antrieb eine relativ grosse Öffnung in Boden und Deckennähe aufweisen. Als Basis für das in diesen Simulationsszenarien modellierte Element dienten die Elemente von Swegon Typ Orto 700 bzw. von Fläkt Typ: BYSE 700. Für die Anordnung wird von je 1 Element oben und unten an der Türe ausgegangen. Eine Darstellung des Elementaufbaus ist in Abbildung 35 im Kapitel 3.1.4 zu finden.

## 4.3 Szenarien

Für die CFD-Simulation wurden verschiedene Szenarien zum Teil mit zwei verschiedenen Modellansätzen berechnet. Tabelle 4 zeigt die untersuchten Simulationsszenarien.

Modell		Model «normiert» mit den Modellgrundlagen gemäss dem Basismodell		Model «Variation» mit angepasster Modellierung vom Atemluftvolumenstrom und den Wärmeverlusten *)	
Aussenbedingungen		Aussenbedingungen isotherm (Aussen und Raumtemperatur bei Simulationsstart 22°C)			
Luftmengen (Zuluft Korridor, Abluft Bad / Küche)		Luftmenge 60 m <sup>3</sup> /h (Standardfall)			
Interne Lasten & Personen		1 Person mit internen Lasten	2 Personen	1 Person mit internen Lasten	2 Personen
Geometrische Anpassung	Türöffnung 5 cm	Szenario 1.1	Szenario 1.3	Szenario 1.1	Szenario 1.3
	Türöffnung 5 cm; Person mit Decke **)				
	Türöffnung 10 cm	(-)	Szenario 2.3	(-)	Szenario 2.3
	Doppelgitter Variante 1 ***)	Szenario 5.1	Szenario 5.3	(-)	Szenario 5.3
	Doppelgitter Variante 2 ***)	(-)	Szenario 5.3, 30/30	(-)	(-)
	Doppelgitter Variante 3 ***)	(-)	Szenario 5.3, 40/40	(-)	(-)
	Doppelgitter Variante 4 ***)	(-)	Szenario 5.3, 20/40	(-)	(-)

Legende: (-) nicht berechnete Modellvarianten

### Bemerkung;

\*) Model «Variation» mit um 15% erhöhtem Atemluftvolumenstrom und um 15% reduzierten Wärmeverlusten der Personen.

\*\*\*) In dieser Untervariante wurde die Person mit einer "Decke" (Wärmedämmung) versehen um diesen Einfluss zu prüfen.

Auf die Auswertung weiterer Türöffnungsvarianten (20cm, Spalt vertikal) sowie anderen Aussentemperaturen (5°C, -5°C) wurde verzichtet.

Dafür wurden insgesamt vier verschiedene varianten des Doppelgitters simuliert um den Einfluss der geometrischen Veränderung zu ermitteln.

\*\*\*\*) Basissall vom Doppelgitter: Abstand von Türblatt oben und unten 20mm; In Varianten 2-4 wird dieser Abstand gemäss den Angaben verändert.

Tabelle 4: Übersicht der zu untersuchenden Szenarien

## 4.4 Resultate der Szenarien

### 4.4.1 Validierung der Simulationsmodelle

In einem ersten Schritt wurden die Szenarien 1.1 (1. Person mit 15 W internen Lasten, 5 cm Türöffnung) und 1.3 (2. Personen ohne interne Lasten, 5 cm Türöffnung) berechnet. Aufgrund der geringen Anstiege der CO<sub>2</sub>-Konzentration in diesen Resultaten wurde eine Variante vom Szenario 1 mit geringeren Luftmengen berechnet, die für einen Vergleich mit den Messresultaten in der Testwohnung eingesetzt wurde. Dieser Vergleich und der Vergleich mit den Messresultaten aus der ROTEG-Forschungswohnung ist nur im Anhang dokumentiert (da das Simulationsmodell danach überarbeitet wurde).

Aufgrund der Resultate wurde das Simulationsmodell noch einmal grundlegend überarbeitet. Die Resultate dieser Berechnungen zum Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Szenario 1.1 im untersuchten Zimmer (Zimmer 2) sind in Abbildung 78 dargestellt. Dabei werden die Resultate des überarbeiteten CFD-Modells für Szenario 1.1 in dieser Abbildung mit den Resultaten des ursprünglichen Modells verglichen.

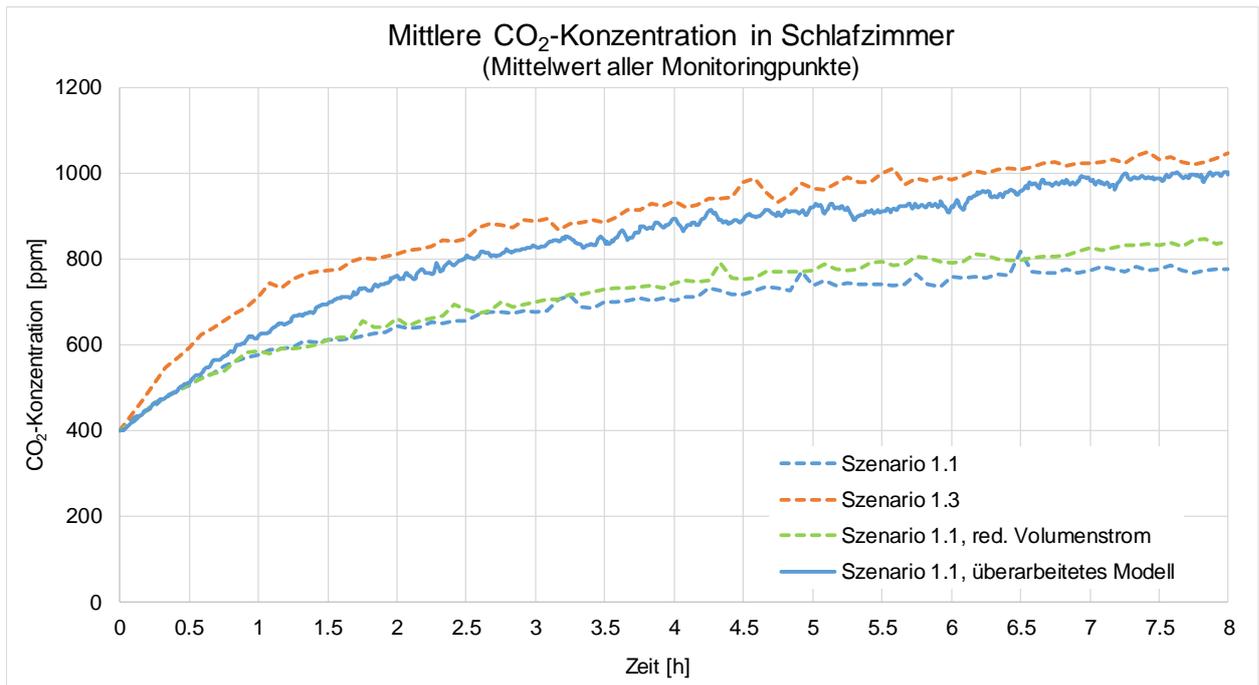


Abbildung 78: Resultate der CFD-Simulation für Szenarien 1.1 und 1.3. Mittelwerte aller CO<sub>2</sub>-Monitoringpunkte

Im überarbeiteten CFD-Modell steigt die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer stärker an und erreicht nach 8 Stunden einen Wert, der um ca. 200 ppm höher liegt als in der ersten Modellversion.

Für das mit dem überarbeiteten Modell gerechnete Szenario 1.1 werden in Abbildung 79 die Anstiege der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Mittelwert in Raum) im Schlafzimmer und im Korridor über die 8 Stunden Berechnungszeit dargestellt.

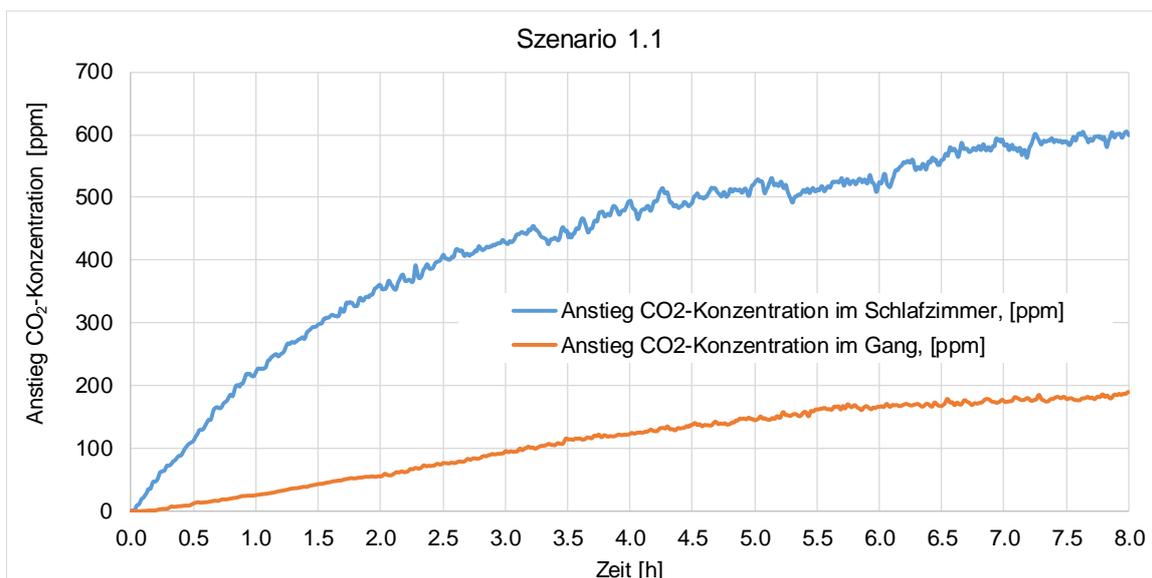


Abbildung 79: Resultate zu Szenario 1.1 aus überarbeiteter CFD-Simulation; Anstieg CO<sub>2</sub>-Konzentration

Während sich im Schlafzimmer eine Erhöhung der mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration um etwa 600 ppm einstellt, steigt im Korridor die CO<sub>2</sub>-Konzentration um etwa 200 ppm. Daraus ergibt sich eine Differenz in der CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen Schlafzimmer und Korridor nach 8 Stunden von etwa 400 ppm.

Abbildung 80 zeigt die im Szenario 1.1 berechnete Temperaturdifferenz zwischen Schlafzimmer und Korridor über die 8 Stunden Berechnungszeit. Die Berechnung zeigt, dass sich ein Temperaturgefälle zwischen Schlafzimmer und Korridor im berechneten Fall (Szenario 1.1) von etwa 0.45 K einstellt.

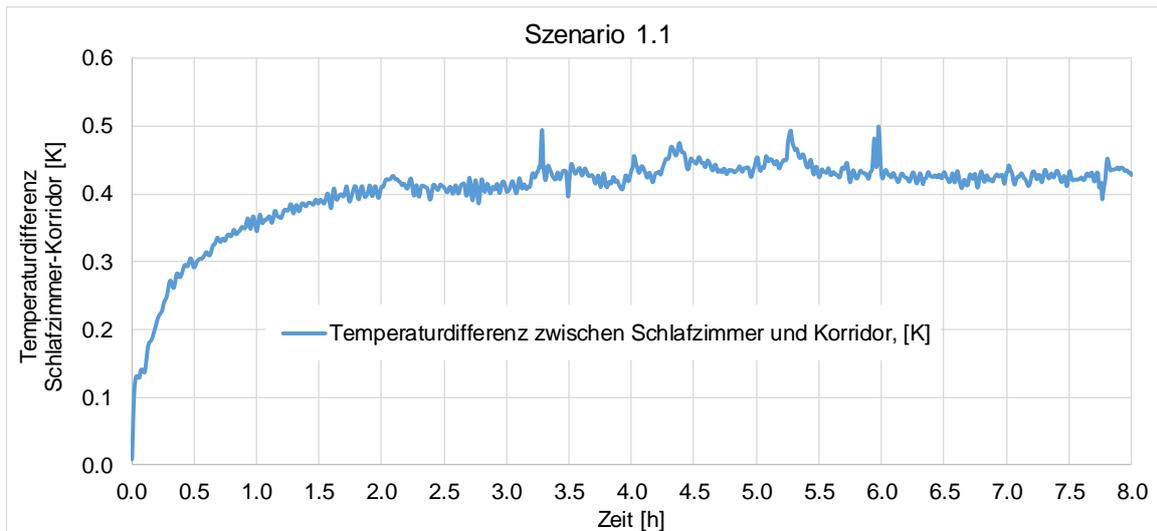


Abbildung 80: Resultate zu Szenario 1.1 aus überarbeiteter CFD-Simulation; Temperaturdifferenz Schlafzimmer-Korridor

In einem weiteren Schritt wurden drei verschiedene Radiationsmodelle untersucht. Diese lagen beim Szenario 1.1 in einer Bandbreite von plus/minus 95 ppm und beim Szenario 1.3 in einer Bandbreite von plus/minus 150 ppm. Aus diesen Erkenntnissen im Vergleich mit den Messungen im «ROTEG»-Forschungshaus wurde es als sinnvoll erachtet, für die weiteren Analysen eine Berechnung mit jeweils zwei Modellen durchzuführen, um einen Erwartungsbereich der Resultate zu erhalten. Damit kann auch die Differenz, welche sich zwischen den Messungen in der Testwohnung und der CFD-Simulation (für vergleichbare Messfälle) zeigte, abgedeckt werden. Für die weitere Bearbeitung wurden folgende zwei Modellvarianten verwendet:

- Model «normiert» mit den Modellgrundlagen gemäss dem Basismodell
- Model «Variation» mit angepasster Modellierung vom Atemluftvolumenstrom (+15%) und um 15% reduzierten Wärmeverlusten der Personen (-15%).

In Abbildung 81 sind die Resultate der beiden Modellvariante für das Szenario 1.3 aufgetragen und mit den Resultaten zur entsprechenden Messung aus der «ROTEG» Forschungswohnung verglichen.

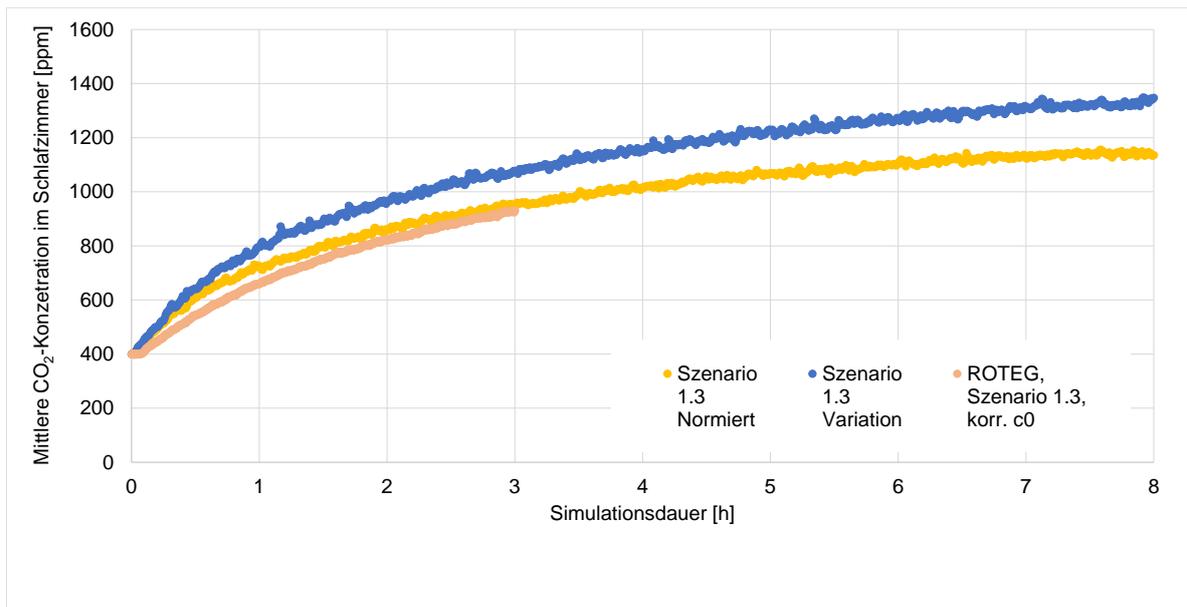


Abbildung 81: Resultate zu Szenario 1.3 mit den beiden Modellvarianten im Vergleich mit der «ROTEG»-Messung

Das «normierte Modell» zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messungen (Messungen in Abbildung 81 zum besseren Vergleich auf einen Startwert von 400 ppm normiert). Das Szenario «Variation» deckt sich dagegen besser mit den Messungen aus der Testwohnung, da dort generell eher höhere Konzentrationsanstiege gemessen wurden. Allerdings ist ein direkter Vergleich mit den Messungen schwierig, da sehr viele Parameter bei der Messung mit realen Bedingungen und Personen nicht bekannt bzw. konstant sind. Dies ist z.B. die Atmung, die metabolische Aktivität, die Hauttemperatur (Oberflächentemperatur), die nicht konstante Aussentemperatur (und damit Zulufttemperatur im Wohnzimmer) etc.

Es muss daher festgehalten werden, dass die Simulationsresultate nur einen Hinweis auf die Wirksamkeit der verschiedenen Varianten geben kann, aber keine genaue Aussage, welche CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem realen Gebäude für diese Variante genau zu erwarten ist. Dies zeigen auch die Differenzen in den Resultaten der Messungen in der Testwohnung bei gleichen Lüftungseinstellungen, aber in unterschiedlichen Nächten (siehe auch Resultate in Kapitel 3.1.4).

#### 4.4.2 Resultate der Simulationsvarianten

In den folgenden Abbildungen werden die Resultate aus den gemäss Tabelle 4 untersuchten Szenarien als Konzentrationsverlauf der mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer über eine Simulationszeit von 8 Stunden dargestellt.

Für die Interpretation der Resultate ist zu beachten, dass beim Start immer in der gesamten Wohnung eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 400 ppm herrscht und bei «Sekunde 0» keine Personen in der Wohnung anwesend sind. Danach (bei «Sekunde 1») liegen die 2 Personen im Schlafzimmer und schlafen (Im normierten Szenario: Wärmeabgabe sensibel pro Person 55 W Atmung entsprechend 12l/h CO<sub>2</sub> pro Person<sup>9</sup>). Im Normalfall wird sich eine Person vor dem Schlafengehen im Wohnzimmer aufhalten und auch das Einschlafen ist ein Prozess, bei dem sich über mehrere Stunden die Körperaktivität (und damit Hauttemperatur, Atmung etc.) verändert.

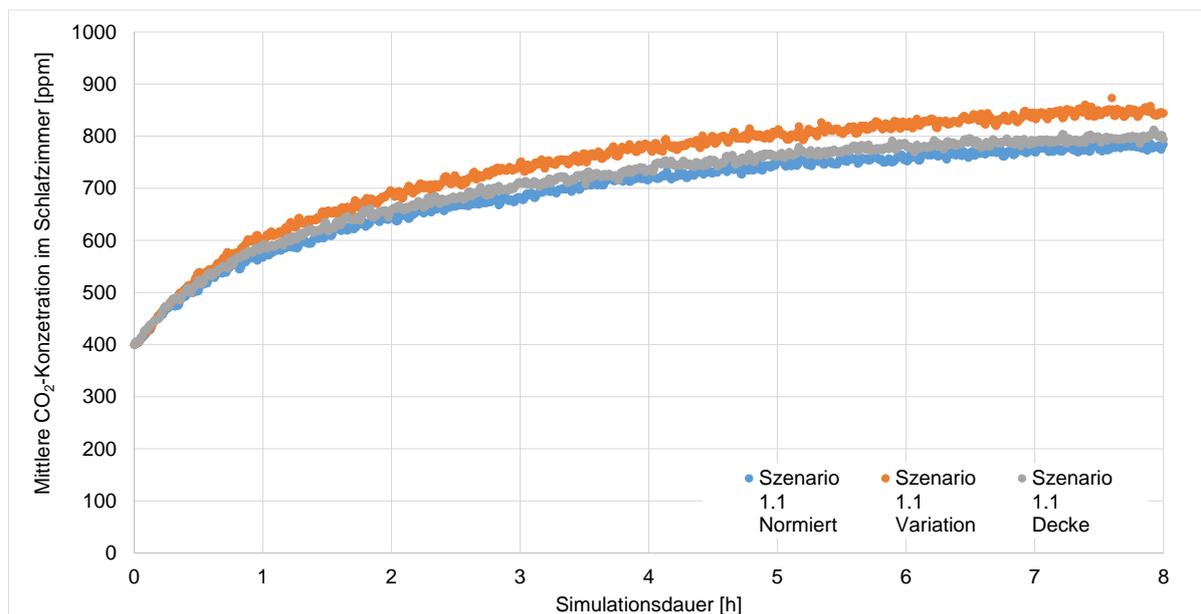


Abbildung 82: Resultate zu Szenario 1.1 mit den beiden Modellvarianten und einer Variante mit Decke

Im Szenario 1.1 zeigt sich ein Anstieg von etwa 400 bis 500 ppm über die 8 Stunden Simulationszeit. In der Simulation hatte die Abdeckung der schlafenden Person mit einer Decke keinen wesentlichen Einfluss auf das Resultat.

<sup>9</sup> Entsprechend «ruhig liegend, schlafend gemäss SIA 180:2014, Tabelle 4

Die Resultate aus dem Szenario 1.3 wurden bereits im vorangehenden Kapitel in Abbildung 81 dokumentiert. In diesem Szenario zeigt sich ein Anstieg von etwa 750 bis 950 ppm über die 8 Stunden Simulationszeit.

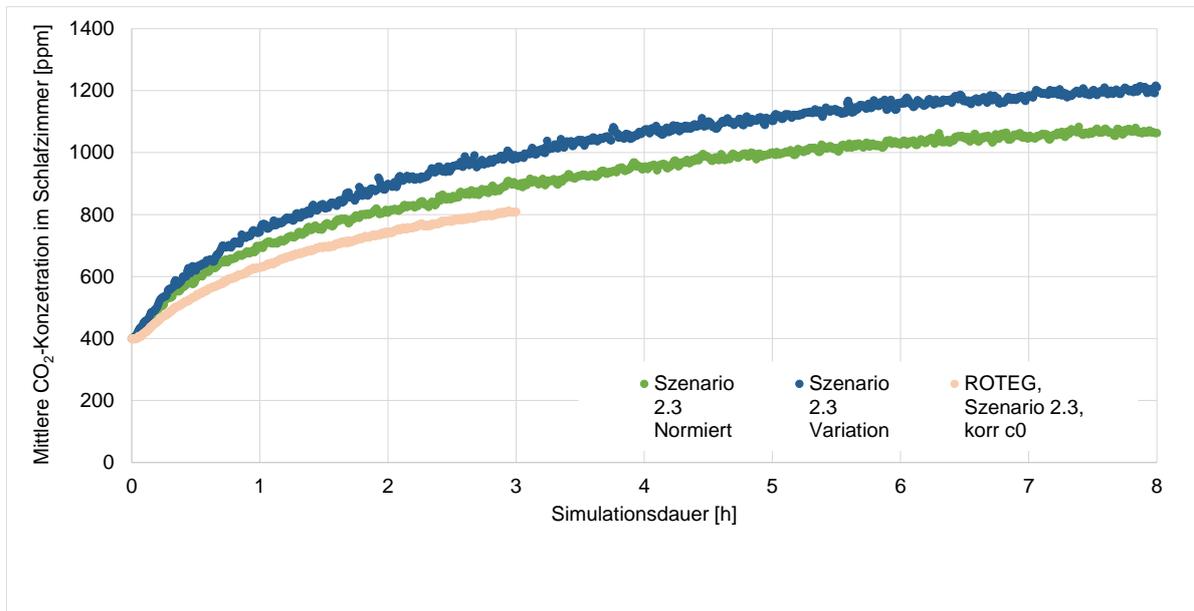


Abbildung 83: Resultate zu Szenario 1.3 mit den beiden Modellvarianten im Vergleich mit der «ROTEG»-Messung

Im Szenario 2.3 zeigt sich ein Anstieg von knapp 700 bis gut 800 ppm über die 8 Stunden Simulationszeit. Der Vergleich mit den Resultaten zur entsprechenden Messung aus der «ROTEG» Forschungswohnung (Messungen zum besseren Vergleich auf einen Startwert von 400 ppm normiert) zeigt, dass bei diesem Szenario die Resultate aus der «ROTEG» Forschungswohnung leicht tiefer ausfallen.

Abbildung 84 zeigt die Resultate für die Szenarien, die mit dem Überströmelement gemäss dem Elementaufbau in Abbildung 35 im Kapitel 3.1.4 aufgebaut sind (für Szenario 5.1 und 5.3).

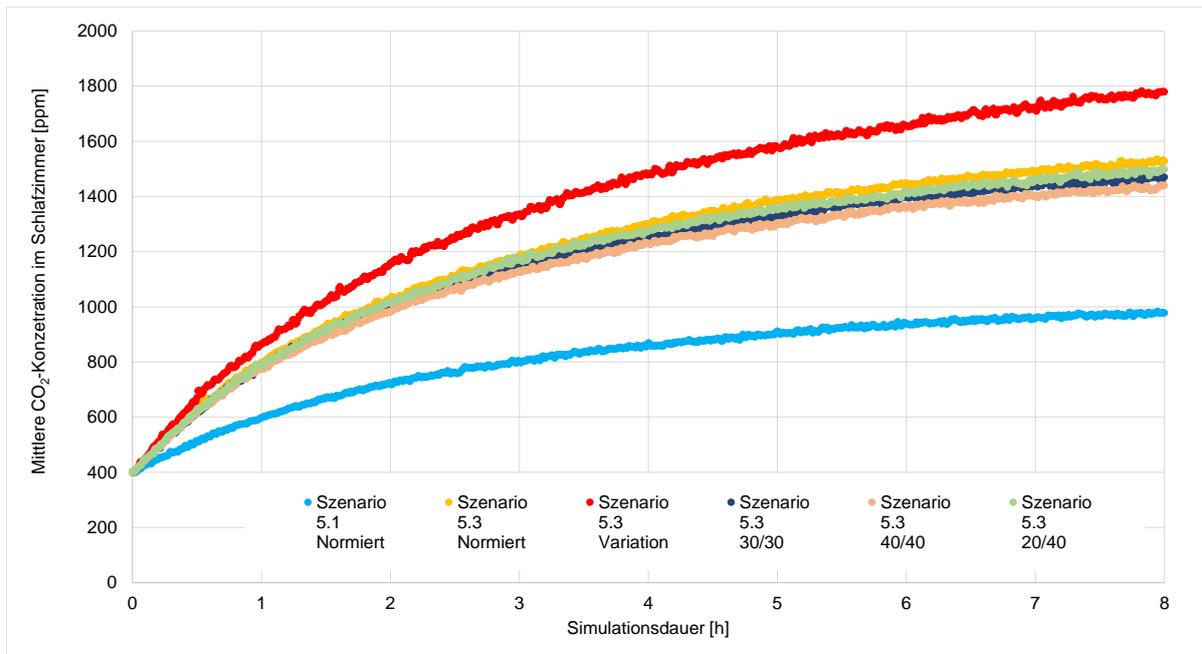


Abbildung 84: Resultate zu Szenario 5.1 und 5.3 mit den beiden Modellvarianten und den Untervarianten von 5.3

Für die Untervarianten vom Szenario 5.3 wurde die Geometrie des Elementes verändert um den Einfluss eines vergrösserten Abstandes der beidseitigen Abdeckungen (im Basisfall  $a = 20$  mm). Die Varianten

beinhalten eine Version mit Abstand  $a = 30$  mm, eine mit Abstand  $a = 40$  mm und eine Version mit unterschiedlichen Abständen  $a = 20$  mm bzw.  $40$  mm (schräge Montage), um die Strömung bzw. den Druckverlust bei besserer Lichtdichtheit zu optimieren.

Im Szenario 5.1 zeigt sich ein Anstieg von etwa 600 ppm über die 8 Stunden Simulationszeit. Im vergleichbaren Aufbau in Szenario 5.3, jedoch mit 2 Personen im Raum, liegt der Anstieg um etwa 550 ppm höher bzw. bei einem Anstieg um gut 1100 ppm. Bei dieser Variante zeigt sich auch eine höhere Streuung zwischen den beiden Modellen. Im Modell «Variation» liegt der Anstieg etwa um 250 ppm höher (bei 1100 ppm). Bei der Variation der Abstände im Überströmelement (berechnet mit dem normierten Modell) zeigte sich keine sehr grosse Differenz. Die maximale Differenz liegt nur bei knapp 100 ppm bei einer Verdopplung des Abstandes von 20 mm auf 40 mm.

Aus der Analyse der Druckdifferenzen zeigt sich, dass die Differenzdrücke, welche für den Luftaustausch sorgen, sehr klein sind. Daher wurde vermutet, dass mit der Vergrößerung des Abstandes der Abdeckungen der Druckverlust wesentlich verringert werden kann und damit sich der Luftaustausch erhöht. Eventuell könnten noch andere Details am Element optimiert werden, um den Druckverlust zu minimieren und damit den Durchsatz zu maximieren. Dies wäre jedoch eine Aufgabe für eine Nachfolgeuntersuchung an einem konkreten Element.

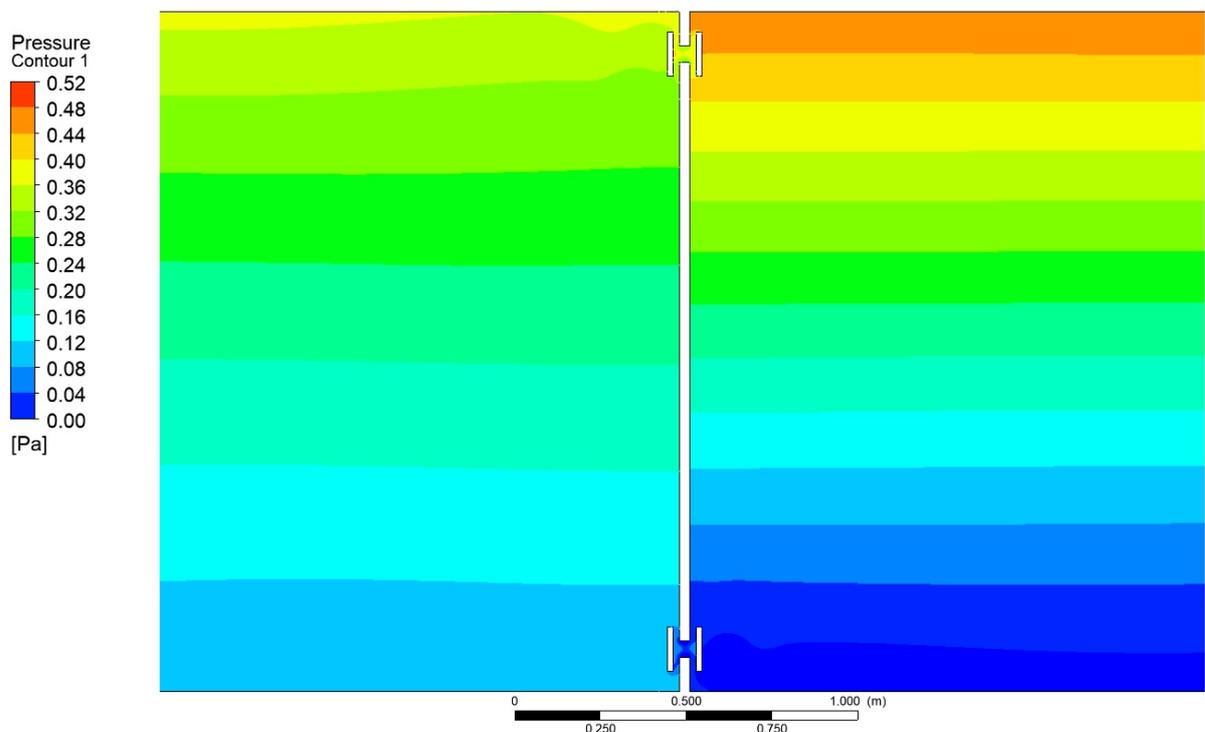


Abbildung 85: Resultate zu den Druckdifferenzen am Überströmelement in Szenario 5.3

In Abbildung 86 und Abbildung 87 wird die Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum für den Berechnungsfall im Szenario 5.3 dargestellt. Die Lage der entsprechenden Querschnitte im Raummodell ist in Abbildung 88 aufgezeigt. Die Resultate in vergleichbarer Darstellung für die anderen Simulationsszenarien sind im Anhang zu finden.

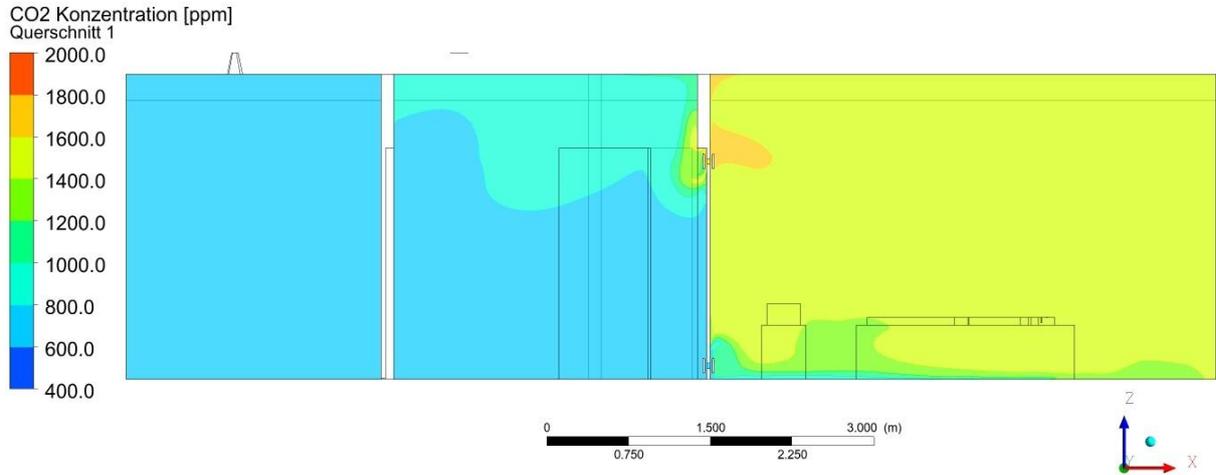


Abbildung 86: Szenario 5.3, Querschnitt Q1 durch das Türelement, Darstellung der CO<sub>2</sub>-Konzentration

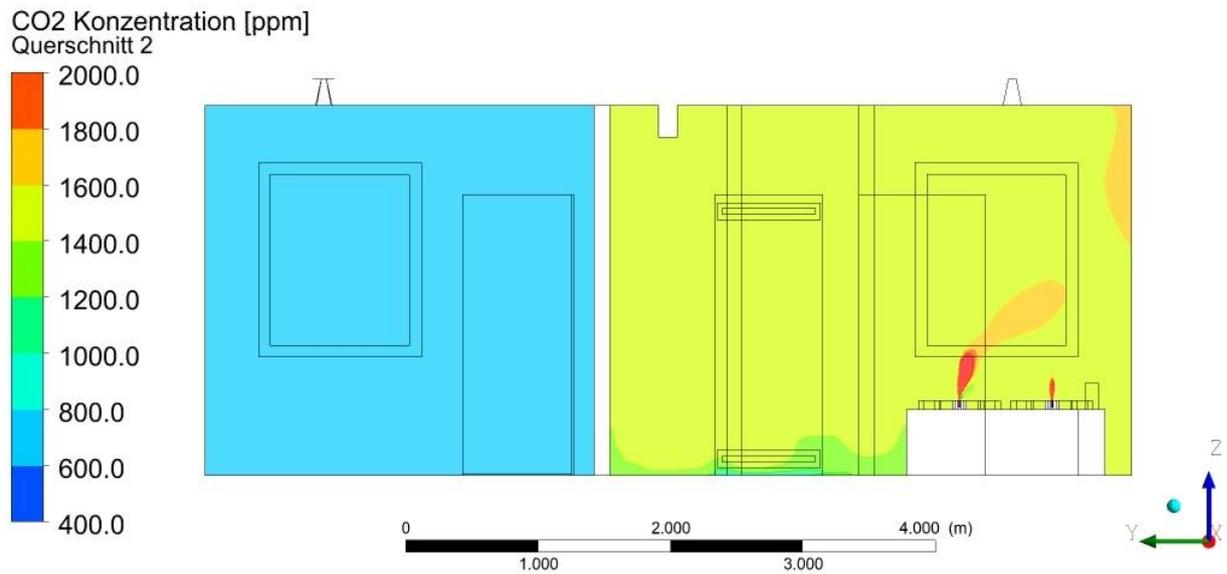


Abbildung 87: Szenario 5.3, Querschnitt Q2 quer zum Bett im Schlafzimmer, Darstellung der CO<sub>2</sub>-Konzentration

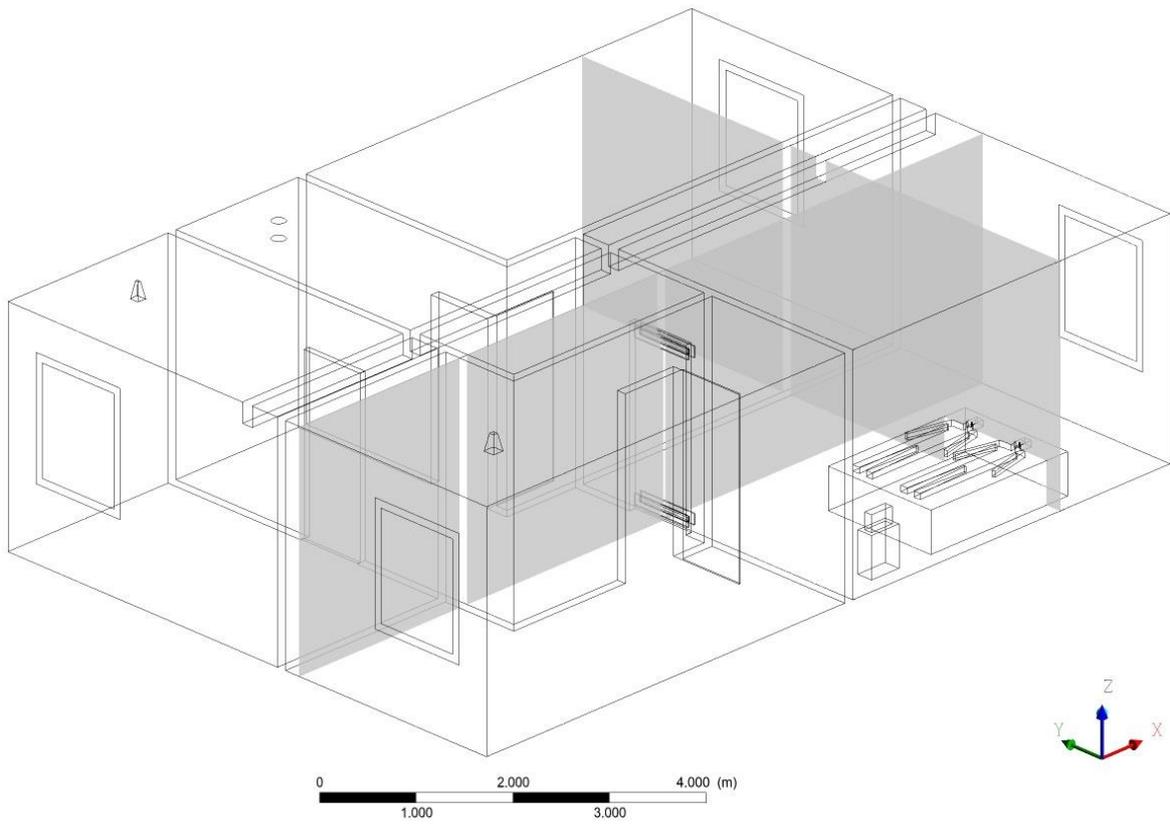


Abbildung 88: Szenario 5.3, 3d-Ansicht mit den Querschnitten Q1 und Q2 zu den Darstellungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration

## 5 Schlussfolgerungen

Aus den Resultaten der verschiedenen Messungen sowie den Simulationen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- In Wohnungen mit offenen Zimmertüren erfolgt ein rascher Ausgleich der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aus den verschiedenen Räumen.
- Die Messungen im realisierten Gebäude zeigen, dass die Bewohner insbesondere nachts die Innentüren oft geschlossen halten. Damit funktioniert der Luftaustausch über offene Türen nicht mehr.
- Bereits bei wenig geöffneten Türen ist eine erhebliche Wirkung auf den Luftaustausch zu erkennen. Insbesondere bei Türöffnungen von 10 cm oder mehr ist der Luftaustausch zwischen Zimmer und Korridor bereits wirksam und kann Spitzen in der Luftbelastung brechen.
- Um bei geschlossenen Türen mit einem passiven Überströmelement einen befriedigenden Luftaustausch zu erreichen, sind grosse Elementquerschnitte (freier Querschnitt ca. 0.1 m<sup>2</sup> oder mehr), eine Anordnung in Boden und Deckennähe (je 50% der freien Fläche) und sehr geringe Druckverluste über das Element (im Bereich von 0.1 Pa) erforderlich.
- Messungen und Simulationen mit einem Element, vergleichbar wie es am Markt verfügbar ist, zeigen, dass damit die hohen Spitzen der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Schlafzimmer (deutlich über 2000 ppm) am frühen Morgen (bei geschlossenen Fenstern) durch den Luftaustausch zwischen Zimmer und Korridor gebrochen werden können.
- Aus den Messungen zeigte sich aber auch, dass die Wirkung stark von den Umgebungsbedingungen abhängig ist und insbesondere bei höheren Aussentemperaturen schlechter funktioniert. Dies ist auf die in diesem Fall geringeren Temperaturdifferenzen zwischen den Räumen zurückzuführen, die als Antrieb für den Luftaustausch über das Türelement wirken.
- Alle Messungen wurden mit CO<sub>2</sub> als Indikatorgas für die Luftqualität durchgeführt. Die Messungen in der Testwohnung zeigten, dass Gerüche nicht gleich effizient abgeführt werden. Qualitative Vergleiche zeigten, dass auch nach einem Abklingen der CO<sub>2</sub>-Werte über den Tag im Schlafzimmer ohne Belegung von 2100 auf 600 ppm Geruchsemissionen noch deutlich wahrgenommen werden. Diese Effekte konnten im Rahmen des Projektes jedoch nicht vertieft untersucht werden.
- Aus dem Vergleich zwischen den Messungen in realen Wohnungen und den Messungen in Laborumgebung mit Dummies bzw. mit der CFD-Simulation wurden erhebliche Differenzen festgestellt, welche die Interpretation bzw. Übertragung dieser Ergebnisse auf reale Situationen stark erschwert.

## 5.1 Diskussion

Aus den Untersuchungen zeigt sich, dass eine rein passive Überströmung in Wohnungen, welche über eine Wohnungslüftung verfügen, aber die Zuluft nur im Korridorbereich eingeblasen wird (Abzug der Abluft im Bad und Küche), verschiedene Hindernisse aufweist. In der Praxis wollen viele Bewohner gerade nachts die Zimmertüren schliessen. Damit kommt in diesen Fällen eine vergleichbare Situation wie in einem Schlafzimmer mit reiner Fensterlüftung zustande (hohe CO<sub>2</sub> Konzentrationen und dadurch hygienisch bedenkliche Raumluftqualität oder Wärme- Behaglichkeitsverlust bei offenen Fenstern). Die Analysen zeigten aber auch, dass bereits eine geringe Öffnung im Türbereich eine erhebliche Wirkung haben kann.

Damit jedoch ein passives Element sinnvoll eingesetzt werden kann, muss es zum einen genügenden Lichtschutz haben und sollte zum anderen eine gewisse Schalldämmung ermöglichen. In der Untersuchung wurde eine Elementkonstruktion gefunden, welche diese Anforderungen erfüllen könnte und auch in den Messungen einen Luftwechsel ermöglicht, der den Anstieg der CO<sub>2</sub> Konzentration in einem Schlafzimmer bei geschlossenen Türen in Grenzen hält.

Es ist jedoch zu erwarten, dass damit nur bei gering belegten Zimmern die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Nacht (bei geschlossenem Fenster und Zimmertüre) wesentlich unter 2000 ppm gehalten werden kann. Da das System nur über die thermische Druckdifferenz funktioniert, weist ein solches System eine deutliche Abhängigkeit von den Aussenbedingungen auf. Wie die Messresultate andeuten, dürfte die Funktion im Winterfall daher besser sein, was dem Anspruch entgegenkommt, im Winter möglichst nicht über die Fenster lüften zu müssen.

Systembedingt hat ein passives Element dabei wesentliche Einschränkungen gegenüber einem aktiven Überströmer. Diese liegen vor allem in der starken Anhängigkeit der Wirksamkeit (erreichter Luftaustausch über das Element) von verschiedenen Randbedingungen (Belegung, Temperaturdifferenzen zwischen den Räumen, Anordnung und Druckverlust des Elementes, etc.).

Die Untersuchung zeigte wesentliche Differenzen zwischen Messungen in realen Wohnungen mit realen Personen und den Messungen in Laborumgebung mit Dummys bzw. mit der CFD-Simulation. Im Rahmen des Projektes konnte nicht abschliessend geklärt werden, durch welche Punkte oder Vereinfachungen diese Differenzen zustande kommen.

## 5.2 Ausblick

Aus der Arbeit zeigen sich die Nachteile und Grenzen der passiven Überströmung durch Zimmertüren gut. Es zeigt sich aber auch, dass der passive Luftaustausch durch Überströmelemente bei entsprechenden Bedingungen durchaus wirksam ist. Bei einfachen Zimmertüren ist insbesondere der Einfluss der Nutzer entscheidend. Diese Erkenntnisse können helfen, die hygienisch unbefriedigende Situation in Schlafzimmern ohne Lüftungssystem zu verbessern. Die erhaltenen Resultate können zudem für die Weiterentwicklung von Elementen zur passiven Überströmung genutzt werden und die Umsetzung von vereinfachten Lüftungskonzepten unterstützen.

Die wichtigsten in diesem Bericht dokumentierten Erkenntnisse sollen als Informationen für Planer und Bauherrschaften in Veranstaltungen und Weiterbildungen von Minergie einfließen. Ebenso wird dies zum einen für die zukünftigen Anforderungen von Minergie relevant sein aber auch für die Weiterentwicklung von Komponenten, welche in der normalen Baupraxis eingesetzt werden könnten.

Um Konzepte mit einer passiven Überströmung zwischen den Zimmern weiterzuentwickeln, wäre in einem ersten Schritt eine Überprüfung der Studienergebnisse an einem real bewohnten Gebäude sinnvoll. Nur so kann eine gewisse Sicherheit erlangt werden, dass das in der Untersuchung verwendete Überströmelement auch in der Praxis tauglich ist und die erwartete Wirkung zeigt. Dabei könnte ev. begleitend auch untersucht werden, ob eine Optimierung des Elementes möglich und auch wirksam ist.

Als Vergleichsbasis für die Abwägung, ob eine passive Überströmung zielführend ist (und wenn ja in welchen Fällen), müsste der direkte Vergleich mit einem aktiven Überströmer gemacht werden.

## 6 Bibliographie

### 6.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Auswertung verschiedener Fälle .....	4
Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Vergleich verschiedener Türöffnungsweiten.....	5
Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Vergleich verschiedener Überströmquerschnitte ..	5
Figure 4: Distribution de fréquence de la concentration de CO <sub>2</sub> en % de la nuit (22h00-6h00) ; évaluation de différentes situations.....	7
Figure 5: Evolution des concentrations en CO <sub>2</sub> , chambre à coucher, période nocturne, différentes situations de la porte intérieure ....	8
Figure 6: Evolution des concentrations en CO <sub>2</sub> , chambre à coucher, période nocturne, disposition des éléments de transfert d'air.....	8
Figure 7: Frequency distribution of CO <sub>2</sub> concentration in % of the night-time (22:00-6:00); evaluation of different situations / cases..	10
Figure 8: Time variation of CO <sub>2</sub> concentration in bedroom, night period, comparison of different opening width (gap) of interior door	11
Figure 9: Time variation of CO <sub>2</sub> concentration in bedroom, night period, comparison of different situations for air transfer elements ..	11
Abbildung 10: Beispiel: Strömung bei einem Lüftungsverbund-Konzept .....	22
Abbildung 11: Beispiele für Querschnitte .....	23
Abbildung 12: Analyse möglicher Einbauelemente .....	24
Abbildung 13: Einfluss Personenzahl im vereinfachten Modell.....	25
Abbildung 14: Einfluss Überströmluftmenge im vereinfachten Modell .....	25
Abbildung 15: Einfluss Aussenluftmenge im vereinfachten Modell.....	26
Abbildung 16: Einfluss Startkonzentration im vereinfachten Modell.....	26
Abbildung 17: Grundriss Wohnung für Testmessungen (System mit KWL-Gerät je Wohnung) .....	27
Abbildung 18: Messsituation bei Testmessungen ohne Zuluft im Schlafzimmer (System mit KWL-Gerät je Wohnung) .....	28
Abbildung 19: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre geschlossen .....	29
Abbildung 20: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre 5 cm offen.....	29
Abbildung 21: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre 10 cm offen.....	30
Abbildung 22: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre 20 cm offen.....	30
Abbildung 23: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Schlafzimmertüre offen .....	31
Abbildung 24: Aufbau der verschiedenen Typen der untersuchten Varianten von Überströmelementen .....	32
Abbildung 25: CO <sub>2</sub> -Konzentration im Schlafzimmer (Wert gegen Nachtende), bei verschiedenen freien Querschnitten.....	33
Abbildung 26: Erhöhung der CO <sub>2</sub> -Konzentration (Wert gegen Nachtende), bei verschiedenen freien Querschnitten .....	33
Abbildung 27: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Nacht, freier Querschnitt oben und unten; A <sub>Frei</sub> = 0.323 m <sup>2</sup> .....	34
Abbildung 28: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Nacht, freier Querschnitt nur oben; A <sub>Frei</sub> = 0.165 m <sup>2</sup> .....	35
Abbildung 29: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Nacht, freier Querschnitt nur unten; A <sub>Frei</sub> = 0.165 m <sup>2</sup> .....	35
Abbildung 30: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Nacht, verkleinerter freier Querschnitt oben und unten; A <sub>Frei</sub> = 0.165 m <sup>2</sup> .....	36
Abbildung 31: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Nacht, Gitter oben und unten, max. Lamellenabstand; A <sub>Frei</sub> = 0.165 m <sup>2</sup> .....	36
Abbildung 32: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Nacht, Gitter vertikal angeordnet; A <sub>Frei</sub> = 0.076 m <sup>2</sup> .....	37
Abbildung 33: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Nacht, Gitter horizontal angeordnet; oben und unten; A <sub>Frei</sub> = 0.076 m <sup>2</sup> .....	37
Abbildung 34: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Nacht, vergrössertes Gitter horizontal; oben und unten; A <sub>Frei</sub> = 0.132 m <sup>2</sup> .....	38

Abbildung 35: Aufbau des Überströmelementes für die Messungen in der Testwohnung .....	38
Abbildung 36: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Schlafzimmer, Nacht, T <sub>a</sub> 10°C, Lüftungsstufe 1, Element: a=20mm .....	39
Abbildung 37: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration im Schlafzimmer, Nachtperiode, Lüftungsstufe 2, Element: a=20mm .....	39
Abbildung 38: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Schlafzimmer, Nacht, T <sub>a</sub> 16-12°C, Lüftungsstufe 1, Element: a=20mm .....	40
Abbildung 39: Verlauf CO <sub>2</sub> -Konzentration, Schlafzimmer, Nacht, T <sub>a</sub> 16-20°C, Lüftungsstufe 2, Element: a=20mm .....	40
Abbildung 40: Planauszug typischer Grundriss einer 3.5 und 4.5-Zi WNG (Bildquelle: Amt für Hochbauten 2017) .....	42
Abbildung 41: Planauszug ungünstiger Grundriss 2.5-Zi WNG (Bildquelle: Amt für Hochbauten 2017) .....	43
Abbildung 42: Wohnung 1; Zimmer 2; Ungünstigste Nachtperiode mit geschlossener Zimmertüre / Fenster .....	45
Abbildung 43: Wohnung 1; Zimmer 2; Typische Nachtperiode mit geschlossener Zimmertüre / Fenster .....	46
Abbildung 44: Wohnung 1; Zimmer 2; Nachtperiode mit kurzzeitiger Öffnung des Fensters .....	46
Abbildung 45: Wohnung 1; Zimmer 2; Nachtperiode mit leicht geöffneter Schlafzimmertüre .....	47
Abbildung 46: Minima, Maxima und Quartile der CO <sub>2</sub> -Messwerte am Tag (6:00-22:00); Wohnung 1 .....	49
Abbildung 47: Minima, Maxima und Quartile der CO <sub>2</sub> -Messwerte in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 1 .....	49
Abbildung 48: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 1, Zimmer 1 .....	50
Abbildung 49: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 1, Zimmer 2 .....	50
Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 1, Zimmer 1 .....	51
Abbildung 51: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 1, Zimmer 2 .....	51
Abbildung 52: Einfluss Türöffnung auf CO <sub>2</sub> -Konzentration; Wohnung 1, Zimmer 1 .....	52
Abbildung 53: Einfluss Türöffnung auf CO <sub>2</sub> -Konzentration; Wohnung 1, Zimmer 1 .....	52
Abbildung 54: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00 – 6:00); Wohnung 1, Zimmer 1 .....	53
Abbildung 55: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00 – 6:00); Wohnung 1, Zimmer 2 .....	53
Abbildung 56: Wohnung 2; Zimmer 1; Nachtperiode ohne Fenster / Türöffnung .....	54
Abbildung 57: Wohnung 2; Zimmer 2; Nachtperiode mit kurzer Periode der Türöffnung .....	54
Abbildung 58: Wohnung 2; Zimmer 3; gleiche Nachtperiode für nicht belegtes Zimmer .....	55
Abbildung 59: Minima, Maxima und Quartile der CO <sub>2</sub> -Messwerte am Tag (6:00-22:00); Wohnung 2 .....	57
Abbildung 60: Minima, Maxima und Quartile der CO <sub>2</sub> -Messwerte in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 2 .....	57
Abbildung 61: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 2, Zimmer 1 .....	58
Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 2, Zimmer 2 .....	58
Abbildung 63: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit am Tag (6:00-22:00); Wohnung 2, Zimmer 3 .....	58
Abbildung 64: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 1 .....	59
Abbildung 65: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 2 .....	59
Abbildung 66: Häufigkeitsverteilung der CO <sub>2</sub> -Konzentration in % der Zeit nachts (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 3 .....	60
Abbildung 67: Einfluss Türöffnung auf CO <sub>2</sub> -Konzentration; Wohnung 2, Zimmer 1 .....	60
Abbildung 68: Wohnung 2; Zimmer 1; 24-h Periode mit langer Periode der geringen Türöffnung nachts (0 min = 19:00) .....	61
Abbildung 69: Einfluss Türöffnung auf CO <sub>2</sub> -Konzentration; Wohnung 2, Zimmer 2 .....	61
Abbildung 70: Einfluss Türöffnung auf CO <sub>2</sub> -Konzentration; Wohnung 2, Zimmer 3 .....	62
Abbildung 71: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 1 .....	62
Abbildung 72: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 2 .....	63

Abbildung 73: Häufigkeit der Türöffnung in der Nacht (22:00-6:00); Wohnung 2, Zimmer 3 .....	63
Abbildung 74: Grundriss «ROTEG» Forschungswohnung (Basis Bildquelle: M. Winsberger, TU Rosenheim, 2019) .....	64
Abbildung 75: Messresultate mittlere CO <sub>2</sub> -Konzentration im Zimmer 2 über die Messzeit (Datenquelle: TH Rosenheim) .....	65
Abbildung 76: Messresultate minimaler, mittlerer und maximaler Anstieg der CO <sub>2</sub> -Konzentration im Zimmer 2, Szenario 1.3.....	66
Abbildung 77: Modellvariante basierend auf dem Grundriss der Forschungswohnung ROTEG .....	67
Abbildung 78: Resultate der CFD-Simulation für Szenarien 1.1 und 1.3. Mittelwerte aller CO <sub>2</sub> -Monitoringpunkte .....	70
Abbildung 79: Resultate zu Szenario 1.1 aus überarbeiteter CFD-Simulation; Anstieg CO <sub>2</sub> -Konzentration .....	70
Abbildung 80: Resultate zu Szenario 1.1 aus überarbeiteter CFD-Simulation; Temperaturdifferenz Schlafzimmer-Korridor.....	71
Abbildung 81: Resultate zu Szenario 1.3 mit den beiden Modellvarianten im Vergleich mit der «ROTEG»-Messung.....	71
Abbildung 82: Resultate zu Szenario 1.1 mit den beiden Modellvarianten und einer Variante mit Decke .....	72
Abbildung 83: Resultate zu Szenario 1.3 mit den beiden Modellvarianten im Vergleich mit der «ROTEG»-Messung.....	73
Abbildung 84: Resultate zu Szenario 5.1 und 5.3 mit den beiden Modellvarianten und den Untervarianten von 5.3.....	73
Abbildung 85: Resultate zu den Druckdifferenzen am Überströmelement in Szenario 5.3 .....	74
Abbildung 86: Szenario 5.3, Querschnitt Q1 durch das Türelement, Darstellung der CO <sub>2</sub> -Konzentration .....	75
Abbildung 87: Szenario 5.3, Querschnitt Q2 quer zum Bett im Schlafzimmer, Darstellung der CO <sub>2</sub> -Konzentration .....	75
Abbildung 88: Szenario 5.3, 3d-Ansicht mit den Querschnitten Q1 und Q2 zu den Darstellungen der CO <sub>2</sub> -Konzentration .....	76
Abbildung 89: Messaufbau mit 12 CO <sub>2</sub> -Messsonden im Zimmer 2 der ROTEG Forschungswohnung .....	84
Abbildung 90: Mobiles Blindelement für Türe in Versuchswohnung zur Messung verschiedener Durchlässe.....	85
Abbildung 91: Datenlogger für Temperatur, Feuchte und CO <sub>2</sub> (Schlaf- und Wohnzimmer).....	89
Abbildung 92: Datenlogger für Temperatur und Feuchte und CO <sub>2</sub> (Bad) .....	89
Abbildung 93: Messelement an Türe / Fenster (in Bild noch ohne Kabel zu Logger).....	89
Abbildung 94: Wohnung 1; Auswertung Temperaturen, Tag.....	90
Abbildung 95: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Temperaturbereiche, Tag .....	90
Abbildung 96: Wohnung 1; Auswertung Temperaturen, Nacht.....	91
Abbildung 97: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Temperaturbereiche, Nacht .....	91
Abbildung 98: Wohnung 2; Auswertung Feuchtebereiche, Tag.....	92
Abbildung 99: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Feuchtebereiche, Tag.....	92
Abbildung 100: Wohnung 2; Auswertung Feuchte, Nacht .....	93
Abbildung 101: Wohnung 2; Auswertung Feuchtebereiche, Nacht.....	93
Abbildung 102: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Feuchtebereiche, Nacht.....	94
Abbildung 103: Wohnung 2; Auswertung Temperaturen, Tag .....	94
Abbildung 104: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Temperaturbereiche, Tag .....	95
Abbildung 105: Wohnung 2; Auswertung Temperaturen, Nacht.....	95
Abbildung 106: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Temperaturbereiche, Nacht .....	96
Abbildung 107: Wohnung 2; Auswertung relative Feuchte, Tag.....	96
Abbildung 108: Wohnung 2; Auswertung Feuchtebereiche, Tag.....	97
Abbildung 109: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Feuchtebereiche, Tag.....	97
Abbildung 110: Wohnung 2; Auswertung relative Feuchte, Nacht.....	98

Abbildung 111: Wohnung 2; Auswertung Feuchtebereiche, Nachts .....	98
Abbildung 112: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Feuchtebereiche, Nacht.....	99
Abbildung 113: Modellierung CO <sub>2</sub> -Abgabe an Dummy in CFD-Simulation .....	100
Abbildung 114: Grundriss für CFD-Simulation (Identisch mit Grundriss «ROTEG» Forschungswohnung) .....	101
Abbildung 115: Vergleich der Resultate zu Szenario 1.3 aus CFD-Simulation und Messung in Forschungswohnung .....	102
Abbildung 116: Vergleich der Resultate zu Szenario 1.1a aus CFD-Simulation und Messresultaten in Testwohnung .....	102
Abbildung 117: Messpunkte im Grundriss der CFD-Simulation für die Resultatauswertung .....	103
Abbildung 118: Zusammenfassung der Szenarien der CFD-Simulation; Mittelwert der Messpunkte im Zimmer 2.....	103
Abbildung 119: Szenario 1.1; Darstellung der Konzentrationsverteilung .....	104
Abbildung 120: Szenario 1.3; Darstellung der Konzentrationsverteilung .....	105
Abbildung 121: Szenario 2.3; Darstellung der Konzentrationsverteilung .....	106
Abbildung 122: Szenario 5.1; Var. 20 / 20 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung .....	107
Abbildung 123: Szenario 5.3; Var. 20 / 20 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung .....	108
Abbildung 124: Szenario 5.3; Var. 30 / 30 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung .....	109
Abbildung 125: Szenario 5.3; Var. 40 / 40 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung .....	110
Abbildung 126: Szenario 5.3; Var. 20 / 40 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung .....	111

## 6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassierung der Raumluftqualität RAL (Quelle: SIA 382/1: 2014) .....	21
Tabelle 2: Übersicht Luftmengen und Belegung der untersuchten Wohnungen .....	44
Tabelle 3: Randbedingungen der Messungen in der «ROTEG» Forschungswohnung.....	65
Tabelle 4: Übersicht der zu untersuchenden Szenarien.....	69
Tabelle 5: Standort und Bezeichnung der CO <sub>2</sub> -Messgeräte im Zimmer 2.....	84
Tabelle 6: Standort und Bezeichnung der eingesetzten Messgeräte und CO <sub>2</sub> -Datenlogger .....	85
Tabelle 7: Resultatzusammenfassung der Messungen in der Testwohnung; Mittelwerte der letzten beiden Nachtstunden, Teil 1 .....	86
Tabelle 8: Resultatzusammenfassung der Messungen in der Testwohnung; Mittelwerte der letzten beiden Nachtstunden, Teil 2 .....	87
Tabelle 9: Verwendete Messgeräte und Datenlogger .....	88
Tabelle 10: Zusammenstellung der Randbedingungen für die CFD-Simulationen.....	100

## 6.3 Literaturverzeichnis

- Barp, S., Fraefel, R. & Huber, H., 2009. *Luftbewegungen in frei durchströmten Wohnräumen*, Zürich: Baudirektion Kanton Zürich; Amt für Hochbau der Stadt Zürich.
- FprSIA 382/5, 2019. *Mechanische Lüftung in Wohngebäuden, Vernehmlassungsentwurf Norm SIA 382/5*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- Keller, B., Woodtli, M. & Eberle, S., 2016. *Lüftung mit aktiver Überströmung: Messung und Aufzeichnung von CO<sub>2</sub>-Konzentrationen*. Zürich: Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft.
- Mikola, A., Rehand, J. & Kurnitski, J., 2019. *Air change efficiency of room ventilation units*. Estonia, CLIMA 2019/Tallinn University of Technology.
- Pfluger, R. et al., 2013. *Komfort- und kostenoptimierte Luftführungskonzepte für energieeffiziente Wohnbauten "Doppelnutzen"-Vorteile und Grenzen der erweiterten Kaskadenlüftung*, Innsbruck: Bundesministerium für Verkehr.
- Remion, G. et al., 2018. *Assessing the performance of hybrid and natural ventilation systems: a review of existing methods*. France, Antibes Juan-Les-Pins Conference Centre.
- Rojas, G., Pfluger, R. & Feist, W., 2015. *Cascade ventilation—Air exchange efficiency in living rooms without separate supply air*. Innsbruck: Universität Innsbruck.
- SIA 180, 2014. *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein (SIA).
- SIA 2023, 2008. *Merkblatt SIA 2023, Lüftung in Wohnbauten*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA).
- SIA 382/1, 2014. *Lüftungs- und Klimaanlageanlagen - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein (SIA).
- SIA 382/5, 2021. *Mechanische Lüftung in Wohngebäuden, Norm SIA 382/5*, Zürich: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- Sibille, E., 2015. *Optimized Integration of Ventilation with Heat Recovery in Residential Buildings through the Implementation of innovative Air Distribution Strategies and Pre-Fabricated Components*. Innsbruck: Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.
- Sibille, E. et al., 2015. *Konzepte für die „low-tech“ Komfortlüftung in großvolumigen Wohngebäuden und deren Nutzungskomfort*. Innsbruck: Klima- und Energiefond des Bundes.
- Sibille, E., Ochs, F., Pfluger & Rainer, 2017. *Planning Guidelines and Product Development for Air Supply Distribution using Active Overflow Elements in Apartment Buildings*, Innsbruck: Universität Innsbruck.
- Strobel, T., Wiirnsberger, M. & Krause, H., 2019. *Vereinfachte Lüftungssysteme für den Wohnungsbau, Untersuchungen in der rotteg Forschungswohnung*. Luzern: Technische Hochschule Rosenheim.
- Yang, B. et al., 2019. A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions. *Energy and Buildings*, 4 August.

## 7 Anhang

### 7.1 Messungen in ROTEG Forschungswohnung

In der ROTEG-Forschungswohnung wurde die Messung im grösseren der beiden Zimmer durchgeführt. Dies, da in diesem Zimmer ein Messaufbau mit insgesamt 12 CO<sub>2</sub>-Messsonden verfügbar war (siehe Abbildung 89)

Tabelle 5: Standort und Bezeichnung der CO<sub>2</sub>-Messgeräte im Zimmer 2

Messort	Messgrösse	Einheit	Messstellenbezeichnung	Messgerät-Typ	Sensor	x [m]	y [m]	z [m]
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.1.0_35	Ahlborn 2890	FYAD 00	3.53	6.00	0.35
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.1.1_4	Ahlborn 2890	FYAD 00	3.53	6.00	1.40
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.1.2_5	Ahlborn 2890	FYAD 00	3.53	6.00	2.50
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.2.0_35	Ahlborn 2890	FYAD 00	1.18	6.00	0.35
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.2.1_4	Ahlborn 2890	FYAD 00	1.18	6.00	1.40
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.2.2_5	Ahlborn 2890	FYAD 00	1.18	6.00	2.50
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.3.0_35	Ahlborn 2890	FYAD 00	3.53	4.00	0.35
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.3.1_4	Ahlborn 2890	FYAD 00	3.53	4.00	1.40
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.3.2_5	Ahlborn 2890	FYAD 00	3.53	4.00	2.50
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.4.0_35	Ahlborn 2890	FYAD 00	1.18	4.00	0.35
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.4.1_4	Ahlborn 2890	FYAD 00	1.18	4.00	1.40
Zimmer 2	CO <sub>2</sub>	ppm	CO2.WZ.4.2_5	Ahlborn 2890	FYAD 00	1.18	4.00	2.50

x, y z entsprechen dem Standort des Messbaumes bzw. dem Fühler am Messbaum

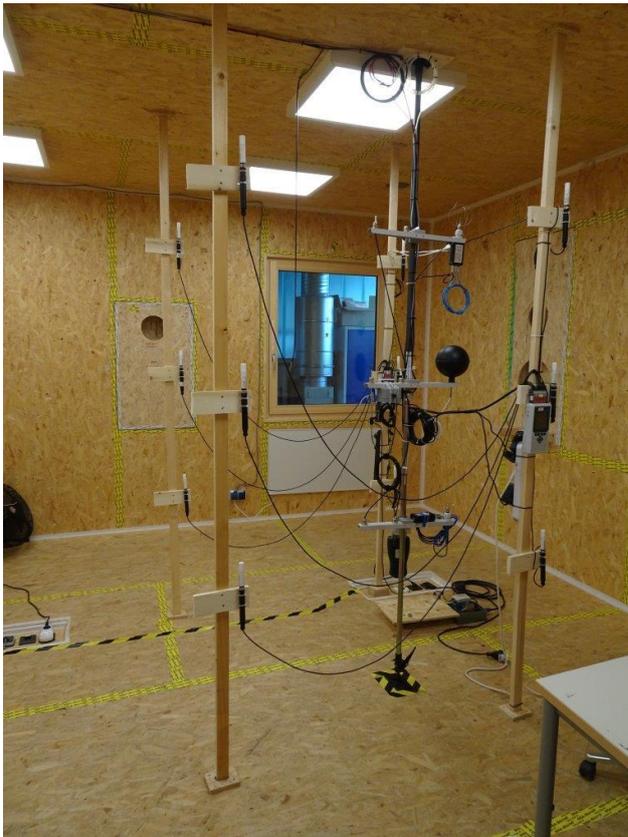


Abbildung 89: Messaufbau mit 12 CO<sub>2</sub>-Messsonden im Zimmer 2 der ROTEG Forschungswohnung

## 7.2 Messungen in Testwohnung

In der Testwohnung wurden vor der Messung die Luftvolumenströme der drei Lüftungsstufen des Lüftungsgerät in der Standardkonfiguration (Zuluft im Schlafzimmer) und in der Spezialkonfiguration (ohne Zuluft in Schlafzimmer) mit dem Flow-Finder gemessen. Während den Messperioden wurden verschiedene Datenlogger zur Aufzeichnung verwendet (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Standort und Bezeichnung der eingesetzten Messgeräte und CO<sub>2</sub>-Datenlogger

Messgerät	Messgröße	Aufstellungsort	Wohnung	Messunsicherheit
1.08 HP 455 FlowFinder	Luftvolumenstrom	-	-	± 5 %, min. 2 m <sup>3</sup> /h (20-50 m <sup>3</sup> /h)
1.07 HP 043	Differenzdruck	-	-	± 2.5 Pa bei 200 Pa
Datenlogger	Messgröße	Aufstellungsort	Höhe	Messunsicherheit
1.16 HP 202	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Schlafzimmer	1.7	Herstellerangaben *)
1.16 HP 201	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Wohnzimmer	1.7	Herstellerangaben *)
1.16 HP 242	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Korridorbereich	1.7	Herstellerangaben *)
1.16 HP 203	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Schlafzimmer (***)	0.1	Herstellerangaben *)
1.16 HP 197	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Schlafzimmer (***)	1.0	Herstellerangaben *)
1.16 HP 194	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Korridorbereich (***)	0.1	Herstellerangaben *)
1.16 HP 248	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Korridorbereich (***)	1.0	Herstellerangaben *)
1.16 HP 205	Temperatur und Feuchte	Bad	1.0	Herstellerangaben **)

\*) CO<sub>2</sub>: 50ppm + 3% vom Messwert; Temperatur: 0.3K (0...+40°C) sonst 0.5K; Feuchte: 2% rel. Feuchte bei 20°C

\*\*) Temperatur: ±0.1°C (+5°C...+45°C); Feuchte: ±2% rel. Feuchte (10...85%, 0...+40°C)

\*\*\*) nur bei einzelnen Messungen eingesetzt

Abbildung 90 zeigt das eingesetzte (mobile) Blindelement, mit dem die Türöffnung der Schlafzimmertüre für Messungen mit verschiedenen Durchlassöffnungen versehen werden konnte.



Abbildung 90: Mobiles Blindelement für Türe in Versuchswohnung zur Messung verschiedener Durchlässe

In Tabelle 7 und Tabelle 8 ist eine Zusammenfassung der Resultate aus den durchgeführten Messungen dargestellt. Die Messwerte beziehen sich dabei immer auf die Mittelwerte der letzten beiden Nachtstunden, um in etwa den Gleichgewichtszustand zu erfassen und die unterschiedlich steilen Anstiege zu Beginn der Nacht nicht mit einzubeziehen. Alle Messungen beziehen sich auf eine Raumbelagung mit 1 Person.

Tabelle 7: Resultatzusammenfassung der Messungen in der Testwohnung; Mittelwerte der letzten beiden Nachtstunden, Teil 1

Peride	ID	Lüftungsstufe [1/2]	Messdauer [h]	Kurzbeschreibung Element / Messfall	freier	Schlafzimmer	Wohnzimmer	Anstieg *)	Standard-	Temperatur	Temperatur-	Aussen-	STABW	
					Querschnitt im Türbereich A <sub>Frei</sub> [m <sup>2</sup> ]	CO <sub>2</sub> [ppm]	CO <sub>2</sub> [ppm]	Differenz SZ-WZ CO <sub>2</sub> [ppm]	abweichung Anstieg *) CO <sub>2</sub> [ppm]	Schlafzimmer [°C]	differenz SZ-WZ **) ΔT [°C]	temperatur [°C]	Aussen- temperatur [°C]	
Messungen mit Luftverteilung mit Zuluft in Schlaf- und Wohnzimmer (Standardkonfiguration der Wohnungslüftung)														
1	10	1	7.30	mit ZUL; Türe, zu	0.00664	1411	584	827		29	25.3	1.4	16.1	1.1
1	11	1	9.60	mit ZUL; Türe, offen	1.74	906	705	201		22	25.1	1.4	12.0	1.8
1	12	1	8.50	mit ZUL; Türe, 10 cm	0.239	818	672	146		31	24.8	1.2	14.0	0.5
1	13	1	5.00	mit ZUL; Türe, offen	1.74	757	690	67		34	24.6	0.9	14.5	0.2
Messungen mit Luftverteilung ohne Zuluft im Schlafzimmer (vereinfacht, ZUL nur im Wohnzimmer; Luluftauslass im Schlafzimmer abgedichtet)														
1	4	2	7.40	Türe, offen	1.74	871	780	91		30	25.1	0.8	15.3	1.4
1	5	2	8.90	Türe, 5 cm	0.118	1469	808	661		36	25.5	0.8	17.8	1.2
1	6	2	9.10	Türe, 20 cm	0.486	895	736	159		41	25.6	1.0	15.7	0.3
1	7	2	9.10	Türe, 60 cm	1.35	828	755	73		25	25.3	1.2	10.2	0.4
1	8	2	7.00	Türe, 10 cm	0.239	1016	769	246		31	25.5	1.1	15.5	0.2
1	9	2	10.80	Türe, 5 cm	0.118	1363	821	542		30	25.5	1.1	18.8	1.2
2	3	1	7.6	Türe, zu	0.00664	2894	476	2418		179	23.7	0.9	10.3	0.2
2	5	2	6.9	Türe, zu	0.00664	3052	495	2557		186	23.8	1.0	11.9	0.2
2	7	1	7.2	Türe, 11 cm	0.263	1095	843	253		24	23.8	0.8	11.8	0.2
2	9	2	8.6	Türe, 11 cm	0.263	1068	735	333		38	24.0	0.7	13.3	0.2
2	10	1	11.0	Türe, 11 cm	0.263	1143	898	245		32	24.1	0.9	14.9	1.3
2	11	1	10.0	Türe, offen	1.74	856	807	49		22	24.2	0.7	19.1	1.6
2	12	2	6.2	Türe, 11 cm	0.263	1061	759	302		45	24.6	1.0	14.8	0.3
2	14	2	7.8	Element "zu"	0.00864	3086	497	2589		91	24.6	1.1	16.0	0.3
2	16	1	8.1	Element "zu"	0.00864	3353	495	2859		161	24.5	1.5	12.2	0.3
2	18	1	7.5	EL_V_10cm	0.209	1116	721	395		38	24.1	1.3	7.3	0.2
2	19	2	9.1	EL_V_10cm	0.209	992	627	365		22	23.9	1.1	9.2	1.0
2	20	2	8.1	EL_H_2x20cm	0.323	950	741	210		24	23.9	0.9	14.6	0.2
2	21	1	10.3	EL_H_2x20cm	0.323	938	786	152		22	23.8	0.8	14.3	0.2
2	22	1	8.6	Element 1	0.165	1404	833	571		36	23.9	1.1	9.3	0.1
2	24	2	5.3	Element 1	0.165	1364	675	689		51	23.7	1.0	13.7	0.1
2	26	2	5.3	Element 1	0.165	1281	643	639		19	23.6	0.9	15.0	0.9
2	27	2	5.3	Türe, 10 cm	0.239	988	675	313		50	23.7	0.7	14.6	0.2
2	28	2	7.4	Element 2	0.165	1049	727	322		44	23.6	1.1	11.5	1.5
2	29	1	4.9	Element 2	0.165	1239	728	510		22	23.6	0.7	19.8	0.6
2	30	1	8.0	Element 2, gedreht	0.165	1189	851	338		20	23.6	1.0	9.6	0.2
2	31	2	9.5	Element 2, gedreht	0.165	1084	675	409		18	23.7	0.9	14.4	0.2
2	33	2	5.7	Element 2o	0.086	1670	643	1027		44	23.7	1.3	5.9	0.6
2	35	2	7.4	Element 2u	0.086	2345	522	1823		72	23.6	1.0	11.5	0.8
2	36	2	10.7	Element 2o	0.086	1961	595	1367		23	23.6	1.0	12.8	0.5
2	37	2	9.6	Element 2	0.086	1112	683	429		30	23.5	0.9	12.6	0.7
2	38	1	8.0	EL_V_10cm	0.209	1147	672	474		28	23.2	0.8	9.4	0.2
2	39	1	7.9	EL_V_10cm	0.209	1191	697	494		19	23.2	0.8	12.5	0.5
2	41	1	9.6	Element 3	0.076	2077	620	1457		66	23.4	1.1	12.8	0.1
2	42	2	9.8	Element 3	0.076	1786	553	1233		25	23.4	1.1	12.8	0.2
2	43	2	12.0	Element 3	0.076	1922	616	1306		21	23.5	1.2	12.8	0.8
2	44	2	6.3	Element 4	0.076	1600	625	976		24	23.4	1.0	13.2	0.4
2	46	1	9.6	Element 4	0.076	1606	724	882		22	23.4	1.1	12.7	0.3
2	48	1	7.5	Element 5	0.132	1380	781	600		57	23.4	1.0	12.4	0.4
2	50	1	9.2	Element 5	0.132	1265	724	541		15	23.4	1.1	13.8	0.1
2	52	2	8.7	Element 5	0.132	1151	707	444		23	23.3	1.3	7.4	0.4

\*) Differenz der CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen Schlafzimmer und dem belüfteten Wohnzimmer (Mittelwert über die letzten 2 Nachtstunden)\*\*) Standardabweichung der Messwertdifferenz der CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen Schlafzimmer und dem belüfteten Wohnzimmer

\*\*\*) Differenz der Raumtemperatur zwischen Schlafzimmer und Wohnzimmer (Mittelwert über die letzten 2 Nachtstunden)

\*\*\*\*) Standardabweichung der Messwerte zur Aussentemperatur (bei hohem Wert ist ein Temperaturanstieg oder -abfall in der Auswertzeit vorhanden)

Tabelle 8: Resultatzusammenfassung der Messungen in der Testwohnung; Mittelwerte der letzten beiden Nachtstunden, Teil 2

Periode	ID	Lüftungsstufe [1/2]	Messdauer [h]	Kurzbeschreibung Element / Messfall	freier Querschnitt im Türbereich $A_{\text{Frei}}$ [m <sup>2</sup> ]	Schlafzimmer CO <sub>2</sub> [ppm]	Wohnzimmer CO <sub>2</sub> [ppm]	Anstieg *) Differenz SZ-WZ CO <sub>2</sub> [ppm]	Standard- abweichung Anstieg *) CO <sub>2</sub> [ppm]	Temperatur Schlafzimmer [°C]	Temperatur- differenz SZ-WZ **) ΔT [°C]	Aussen- temperatur [°C]	STABW Aussen- temperatur ***) [°C]
Messungen mit Luftverteilung ohne Zuluft im Schlafzimmer (vereinfacht, ZUL nur im Wohnzimmer; Luluftauslass im Schlafzimmer abgedichtet)													
4	1	1	9.8	Element 5	0.132	1325	754	570	27	22.8	0.7	10.7	0.5
4	2	1	7.8	Element 1	0.165	1221	842	379	43	22.9	0.8	11.2	0.1
4	3	1	8.8	EL. Ho_1x20cm	0.165	1864	733	1131	27	22.9	0.9	10.6	0.2
4	4	1	10.1	EL. Hu_1x20cm	0.165	2405	728	1676	31	23.1	1.3	5.2	0.4
4	5	1	9.7	Türe, 8 cm	0.189	1112	858	254	23	22.9	0.9	9.2	0.1
4	6	1	8.3	Türe, offen	1.74	793	821	-27	25	22.7	0.7	8.4	0.1
4	7	1	7.2	Türe, 10 cm	0.239	985	808	176	26	22.6	0.8	1.7	0.1
4	8	1	8.2	Türe, 5 cm	0.118	1276	797	479	125	22.4	0.6	5.1	0.1
4	9	1	11.1	Türe, 20 cm	0.486	985	818	166	17	22.5	0.7	4.4	0.3
4	10	1	10.8	Türe, 5 cm	0.118	1327	814	513	25	22.6	0.9	1.8	0.5
4	11	1	9.1	Element "zu"	0.00864	3852	602	3250	92	22.7	0.8	1.6	0.5
4	18	1	10.9	Türe, 10 cm	0.239	1278	797	482	41	22.4	0.6	4.2	0.1
5	1	2	8.8	Türe, 5 cm, Pi ****)	0.118	1273	706	567	29	23.5	0.9	-2.0	0.5
5	2	2	10.0	Türe, 5 cm	0.118	1236	685	551	47	23.3	0.9	-2.3	0.8
5	3	2	10.1	Türe, 5 cm, Pi ****)	0.118	1361	732	629	22	23.4	0.9	-0.7	1.0
5	4	2	10.0	Türe, 5 cm	0.118	1383	742	641	33	23.4	0.9	1.6	1.0
10	1	2	8.5	Element 10.1	0.098	1614	732	883	25	24.2	1.3	4.9	0.1
10	3	2	7.6	Element 10.1	0.098	1580	644	936	30	24.2	1.1	9.3	0.2
10	4	1	6.9	Element 10.1	0.098	1707	700	1008	19	23.9	1.2	10.3	0.1
10	6	1	8.0	Element 10.1	0.098	1634	691	943	49	23.7	1.1	12.6	2.0
10	7	1	9.0	Element 10.1	0.098	2064	872	1192	35	23.9	1.1	13.9	2.7
10	8	2	7.2	Element 10.1	0.098	1695	722	973	25	23.8	0.9	22.3	2.5
10	9	2	8.6	Element 10.1	0.098	1960	758	1202	48	24.1	0.9	12.7	3.3
10	10	2	10.1	Element 10.1	0.098	1703	681	1021	29	24.3	0.8	23.9	3.1
10	11	1	8.2	Element 10.1	0.098	2199	809	1390	61	24.5	0.6	13.4	2.4
10	13	2	8.2	Element 10.1	0.098	1850	663	1188	28	24.6	0.6	24.4	2.1
10	14	2	11.5	Element 10.1	0.098	1567	728	839	25	24.6	1.2	15.7	0.9
10	15	2	6.2	Element 10.1	0.098	1642	702	941	32	24.6	1.0	14.1	5.1
10	16	2	7.9	Element 10.1g	0.098	1256	735	521	345	24.5	1.1	18.7	5.0
10	17	2	6.3	Türe offen	1.74	789	763	26	28	24.3	0.7	12.4	1.9
10	18	2	5.1	Türe offen	1.74	783	762	22	29	24.3	0.7	11.5	1.7
10	19	2	7.8	Element 10.1	0.098	1435	670	765	39	24.2	1.0	17.6	3.0
11	38	2	9.4	Türe offen	1.74	732	671	61	18	25.7	0.8	17.5	1.1

\*) Differenz der CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen Schlafzimmer und dem belüfteten Wohnzimmer (Mittelwert über die letzten 2 Nachtstunden)\*\*) Standardabweichung der Messwertdifferenz der CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen Schlafzimmer und dem belüfteten Wohnzimmer

\*\*\*) Differenz der Raumtemperatur zwischen Schlafzimmer und Wohnzimmer (Mittelwert über die letzten 2 Nachtstunden)

\*\*\*\*) Standardabweichung der Messwerte zur Aussentemperatur (bei hohem Wert ist ein Temperaturanstieg oder -abfall in der Auswertzeit vorhanden)

\*\*\*\*\*) Messung mit zusätzlicher interner Last von 13 W (Dauerbetrieb über Messzeit)

## 7.3 Messungen im realisierten Gebäude

### 7.3.1 Messmittel

Mittels mobiler Datenlogger wurden während 3 Wochen pro Wohnung folgende Messungen durchgeführt:

- Messung der Zuluft- und Abluftvolumenströme in der Wohnung zu Beginn der Messperiode
- Je ein Datenlogger für Temperatur, Feuchte und CO<sub>2</sub> in jedem Zimmern
- Ein Datenlogger für Temperatur und Feuchte im Badezimmer
- Logger, um die Türstellung der Türen zu den Schlafzimmern aufzuzeichnen
- Logger, um die Fensteröffnung in den Schlafzimmern aufzuzeichnen (Hauptlüftungsfenster)
- Aussenbedingungen (Temperatur / Feuchte), z.B. auf Balkon

In Tabelle 9 sind die verwendeten Messgeräte und Datenlogger aufgeführt.

Tabelle 9: Verwendete Messgeräte und Datenlogger

Wohnung	Messgerät	Messgrösse	Aufstellungsort	Messunsicherheit
-	1.08 HP 455 FlowFinder	Luftvolumenstrom	-	± 5 %, min. 2 m <sup>3</sup> /h (20-50 m <sup>3</sup> /h)
-	1.07 HP 043	Differenzdruck		± 2.5 Pa bei 200 Pa
Wohnung	Datenlogger	Messgrösse	Aufstellungsort	Messunsicherheit
1	1.16 HP 201	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Zimmer 1	Herstellerangaben *)
1	1.16 HP 242	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Wohnzimmer	Herstellerangaben *)
1	1.16 HP 204	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Zimmer 2	Herstellerangaben *)
1	1.16 HP231	Temperatur und Feuchte	Reduit	Herstellerangaben **)
1	1.16HP237	Temperatur und Feuchte	Bad	Herstellerangaben **)
1	839402	Türstellung	Zimmer 1	k.A. (Spannungslogger)
1	839405	Türstellung	Zimmer 2	k.A. (Spannungslogger)
1	F4_Lascar	Fensteröffnung	Zimmer 1	k.A. (Spannungslogger)
1	F2_Lascar	Fensteröffnung	Zimmer 2	k.A. (Spannungslogger)
2	1.16 HP 202	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Wohnzimmer	Herstellerangaben *)
2	1.16 HP 246	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Zimmer 1	Herstellerangaben *)
2	1.16 HP 194	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Zimmer 2	Herstellerangaben *)
2	1.16 HP 245	CO <sub>2</sub> , Temperatur, Feuchte	Zimmer 3	Herstellerangaben *)
2	1.16 HP234	Temperatur und Feuchte	Balkon	Herstellerangaben **)
2	1.16HP235	Temperatur und Feuchte	Bad	Herstellerangaben **)
2	839406	Türstellung	Zimmer 1	k.A. (Spannungslogger)
2	857638	Türstellung	Zimmer 2	k.A. (Spannungslogger)
2	857640	Türstellung	Zimmer 3	k.A. (Spannungslogger)
2	839404	Türstellung	Küche	k.A. (Spannungslogger)
2	F5_Lascar	Fensteröffnung	Zimmer 1	k.A. (Spannungslogger)
2	F3_Lascar	Fensteröffnung	Zimmer 2	k.A. (Spannungslogger)
2	F1_Lascar	Fensteröffnung	Zimmer 3	k.A. (Spannungslogger)

\*) CO<sub>2</sub>: 50ppm + 3% vom Messwert; Temperatur: 0.3K (0...+40°C) sonst 0.5K; Feuchte: 2% rel. Feuchte bei 20°C

\*\*\*) Temperatur: ±0.1°C (+5°C...+45°C); Feuchte: ±2% rel. Feuchte (10...85%, 0...+40°C)



Abbildung 91: Datenlogger für Temperatur, Feuchte und CO2 (Schlaf- und Wohnzimmer)



Abbildung 92: Datenlogger für Temperatur und Feuchte und CO2 (Bad)



Abbildung 93: Messelement an Türe / Fenster (in Bild noch ohne Kabel zu Logger)

### 7.3.2 Resultate Wohnung 1

Im Folgenden sind weitergehende Auswertungen und Resultate zur Wohnung 1 dokumentiert. Neben den Auswertungen im Hauptbericht wurden die Messdaten zu Temperatur und Feuchte für Tag und Nacht genauer ausgewertet und werden in den folgenden Abbildungen dargestellt.

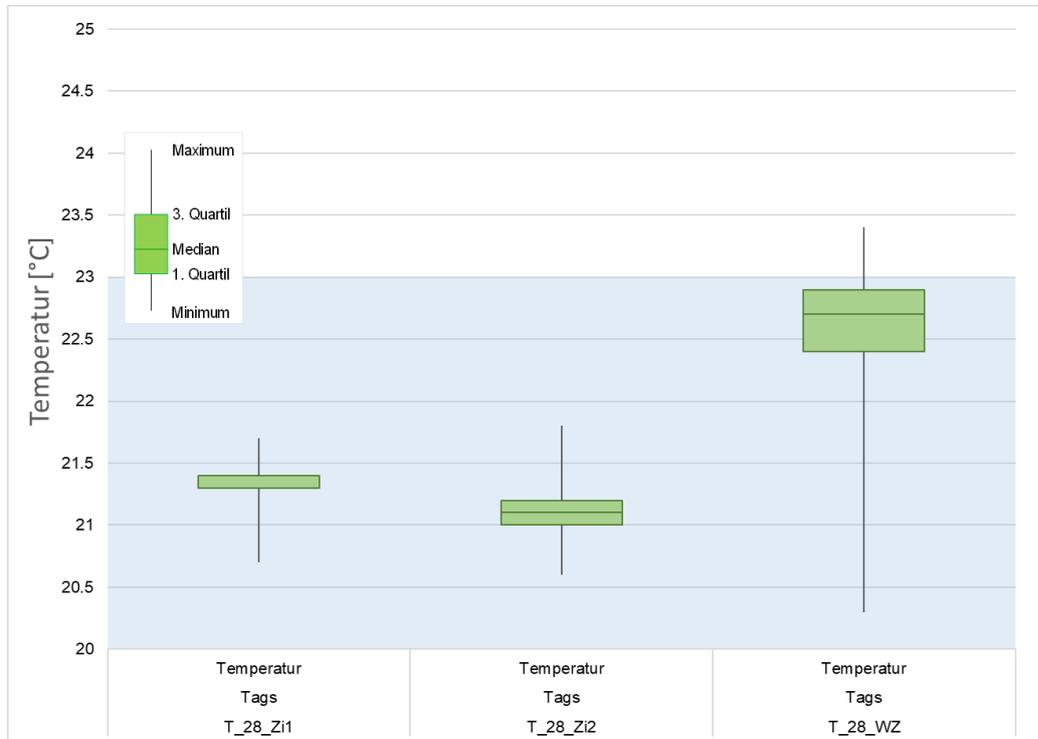


Abbildung 94: Wohnung 1; Auswertung Temperaturen, Tag

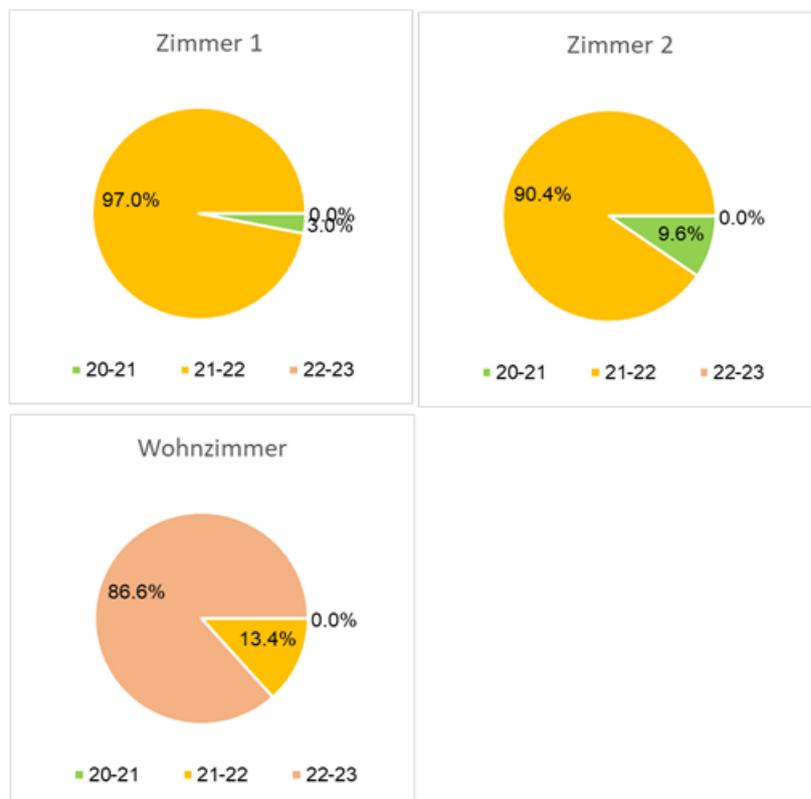


Abbildung 95: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Temperaturbereiche, Tag

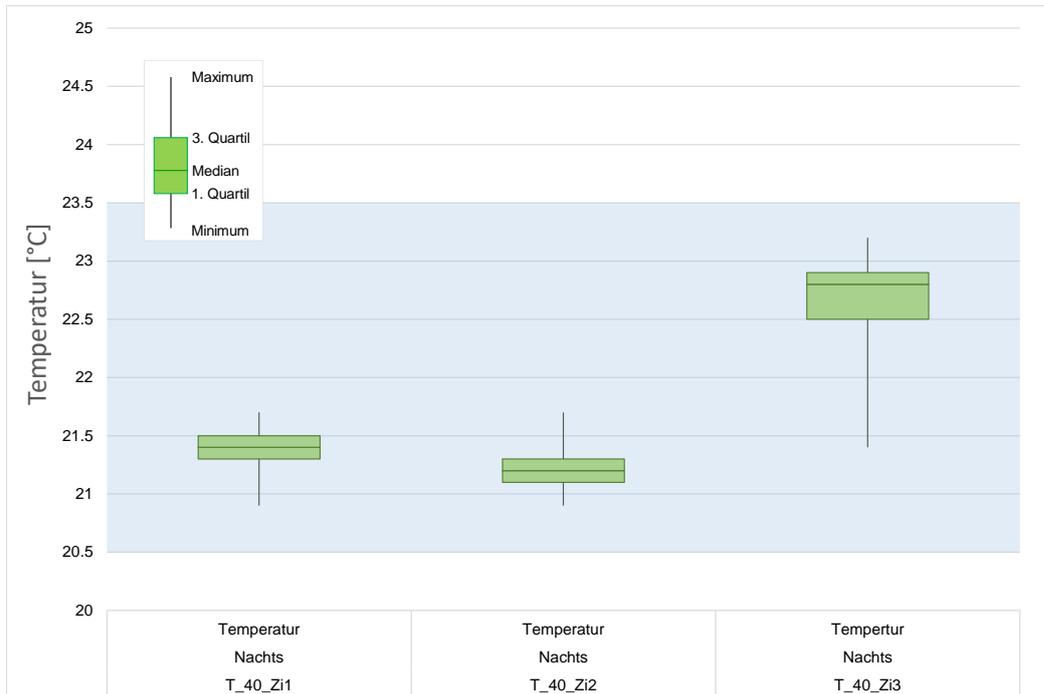


Abbildung 96: Wohnung 1; Auswertung Temperaturen, Nacht

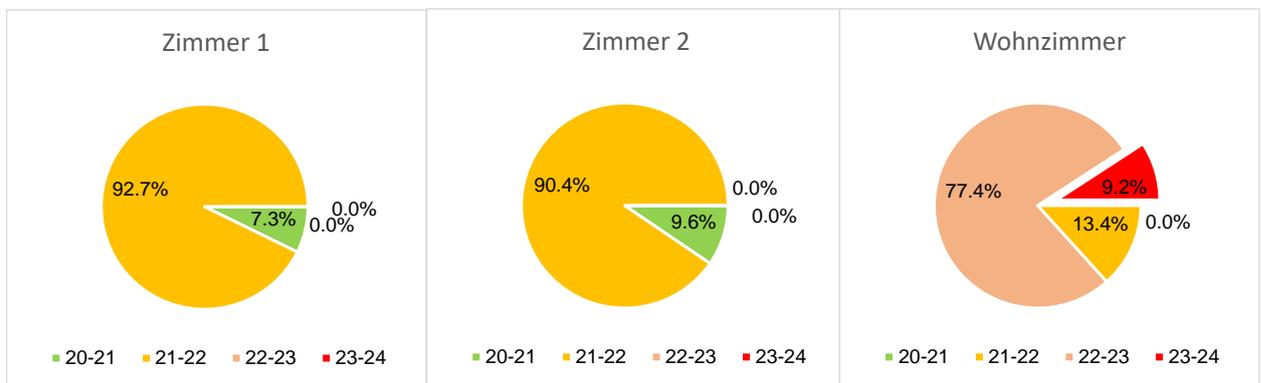


Abbildung 97: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Temperaturbereiche, Nacht

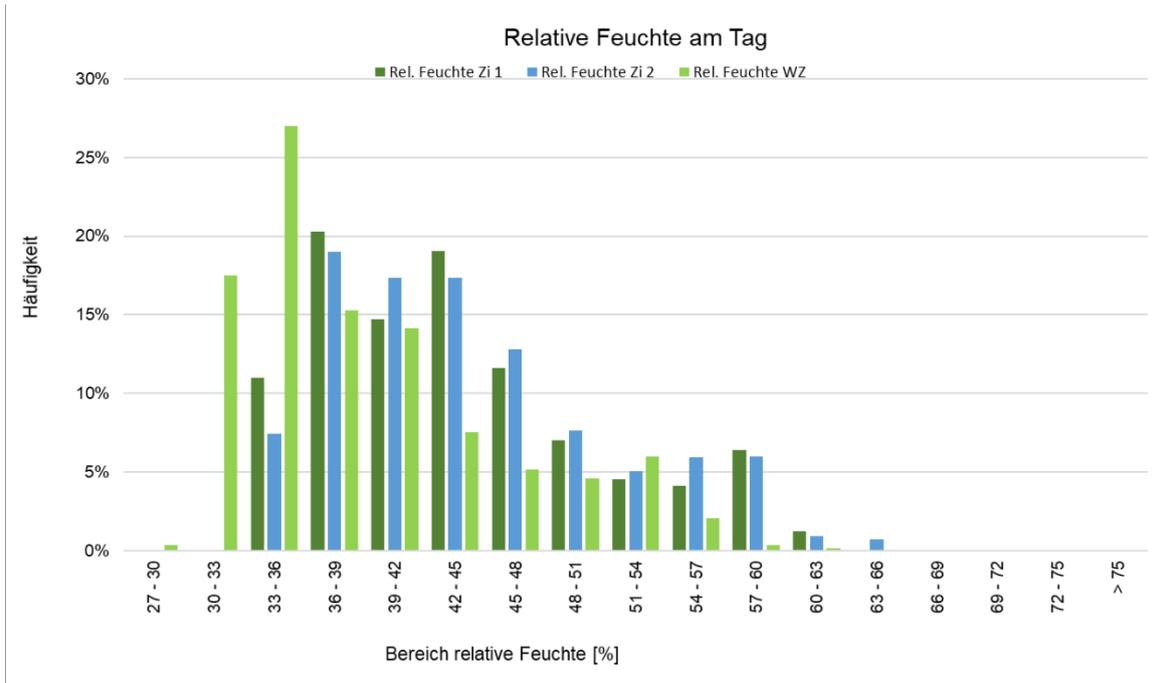


Abbildung 98: Wohnung 2; Auswertung Feuchtebereiche, Tag

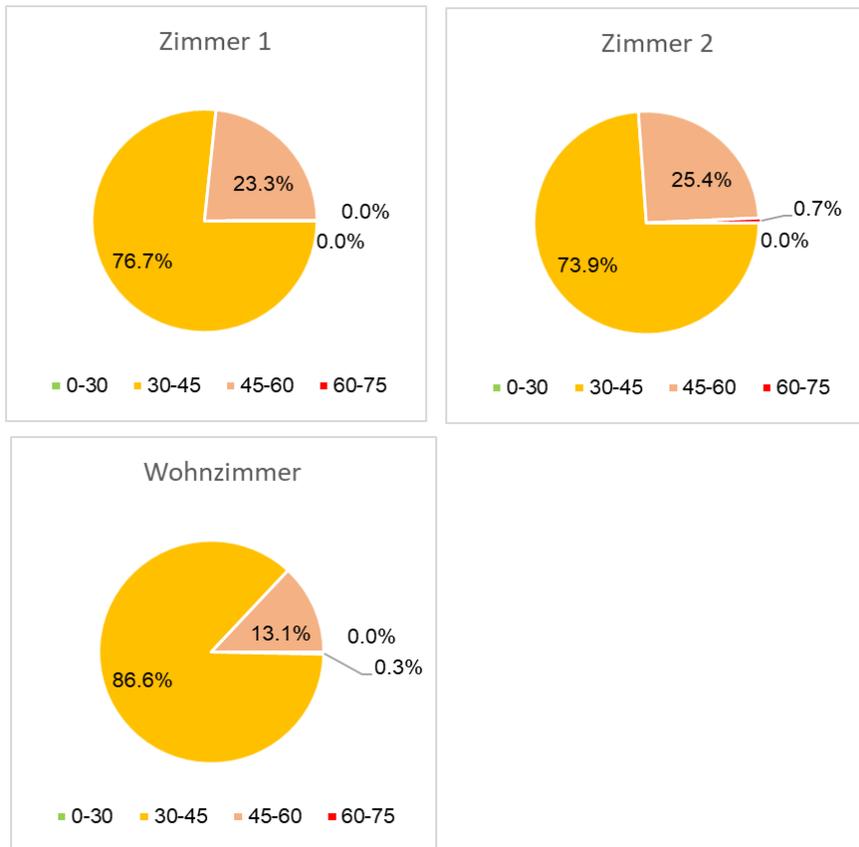


Abbildung 99: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Feuchtebereiche, Tag



Abbildung 100: Wohnung 2; Auswertung Feuchte, Nacht

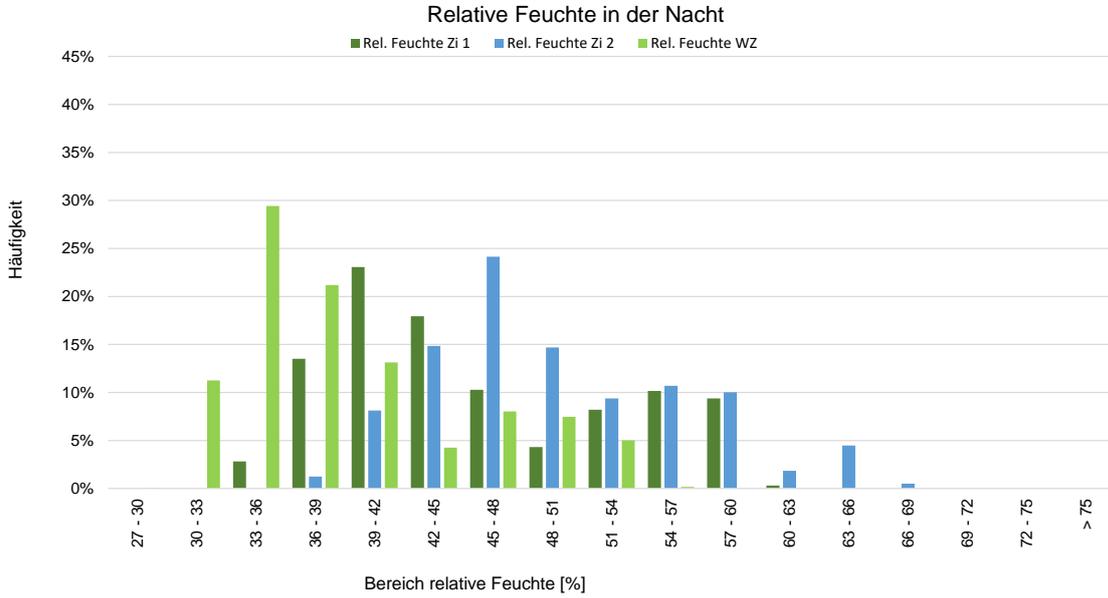


Abbildung 101: Wohnung 2; Auswertung Feuchtebereiche, Nacht

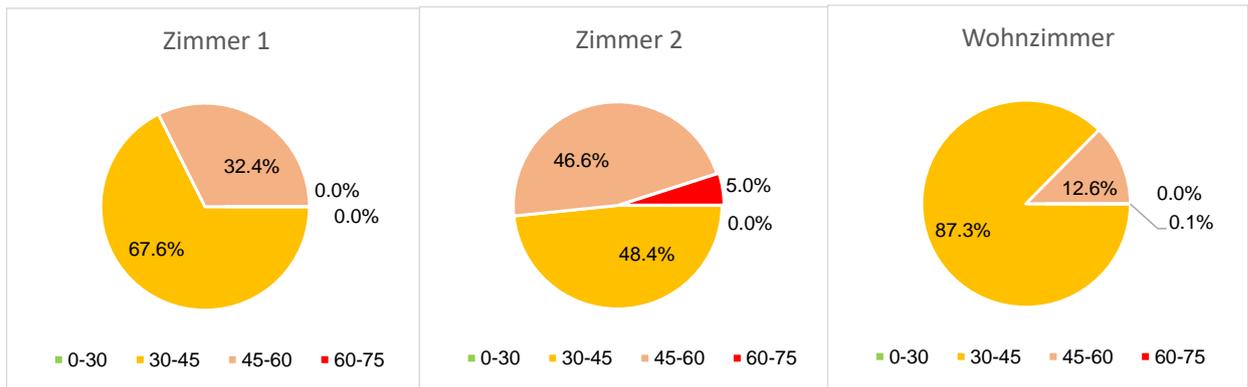


Abbildung 102: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Feuchtebereiche, Nacht

### 7.3.3 Resultate Wohnung 2

Im Folgenden sind weitergehende Auswertungen und Resultate zu den beiden untersuchten Wohnungen dokumentiert. Neben den Auswertungen im Hauptbericht wurden die Messdaten zu Temperatur und Feuchte für Tag und Nacht genauer ausgewertet.

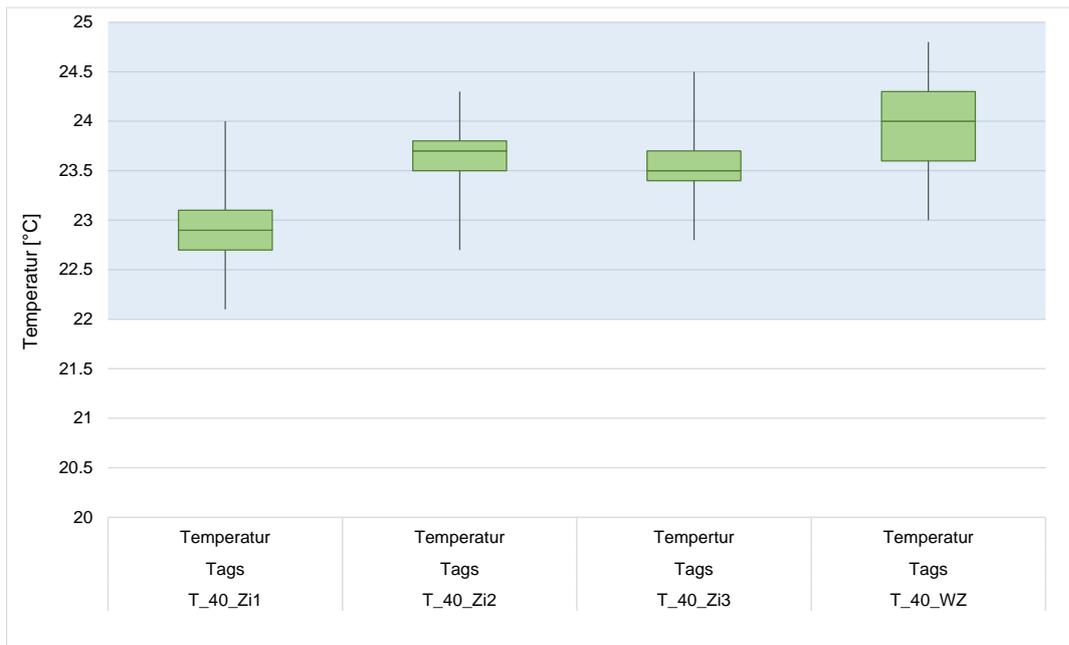


Abbildung 103: Wohnung 2; Auswertung Temperaturen, Tag

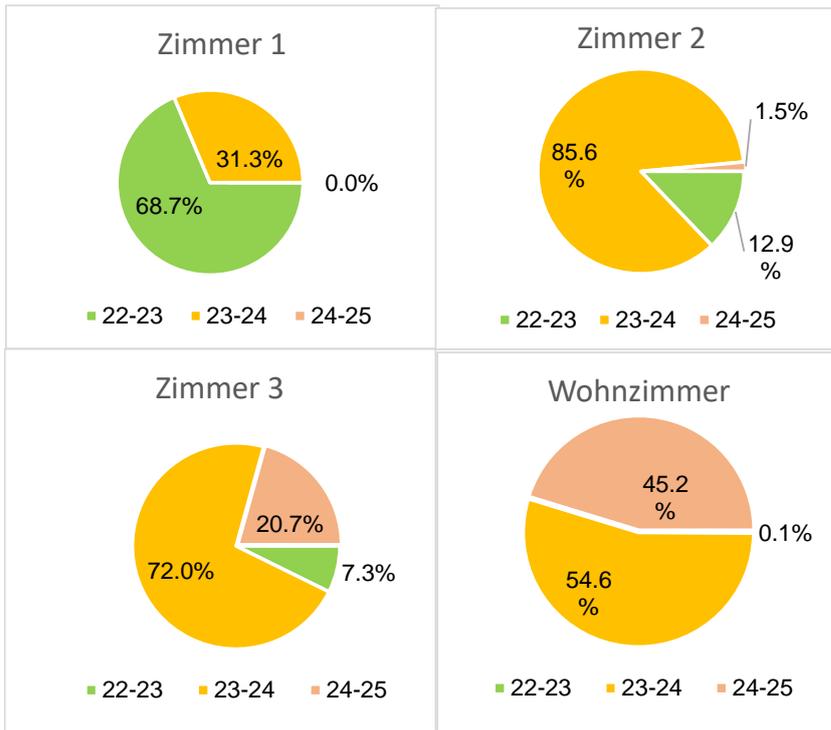


Abbildung 104: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Temperaturbereiche, Tag

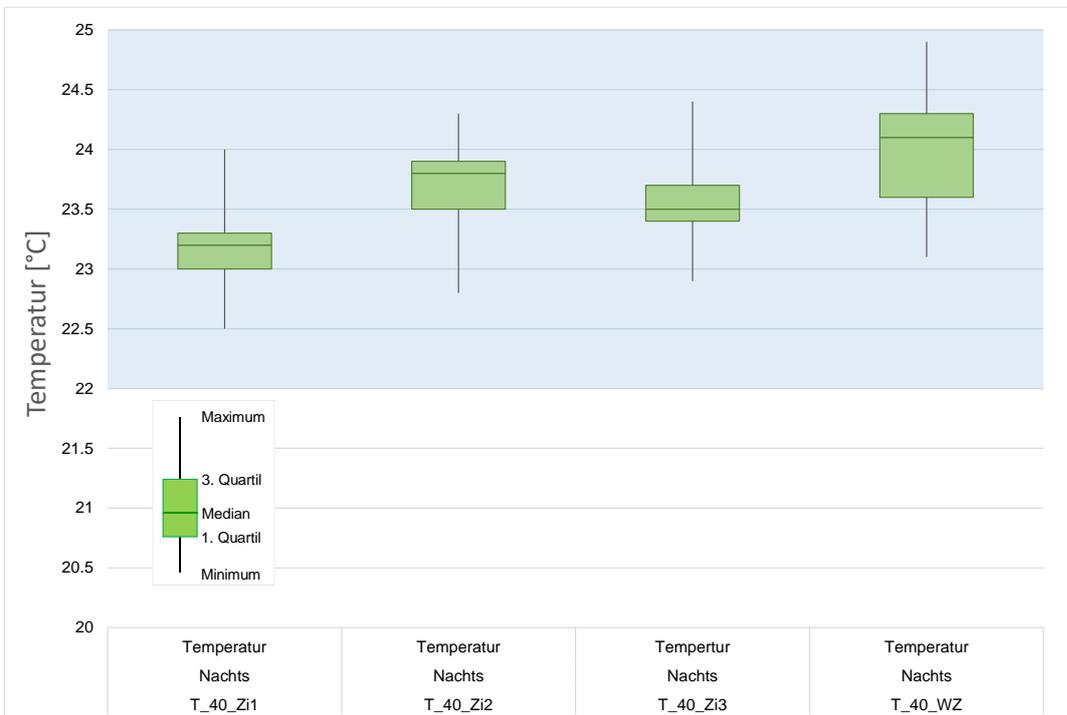


Abbildung 105: Wohnung 2; Auswertung Temperaturen, Nacht

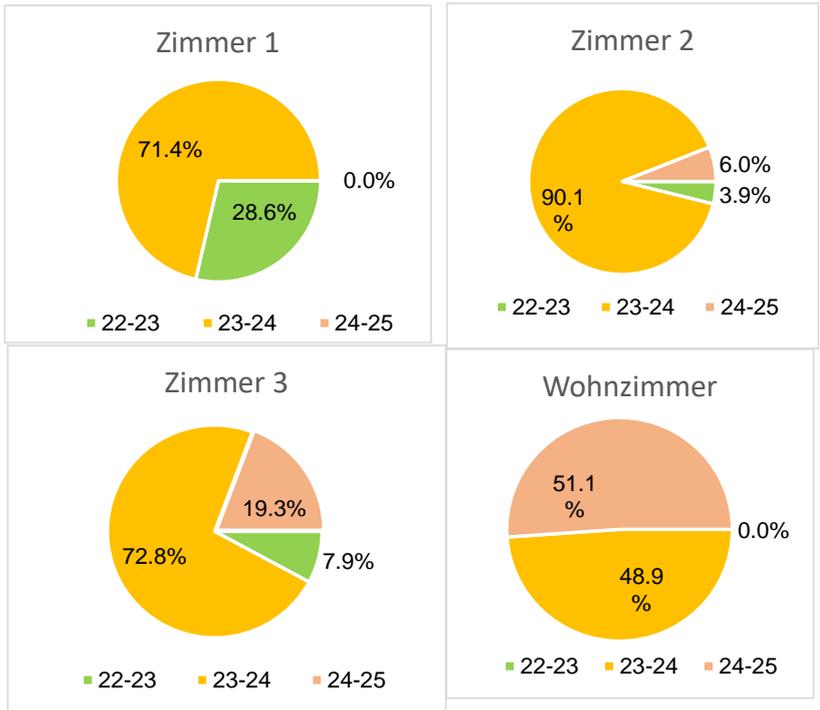


Abbildung 106: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Temperaturbereiche, Nacht

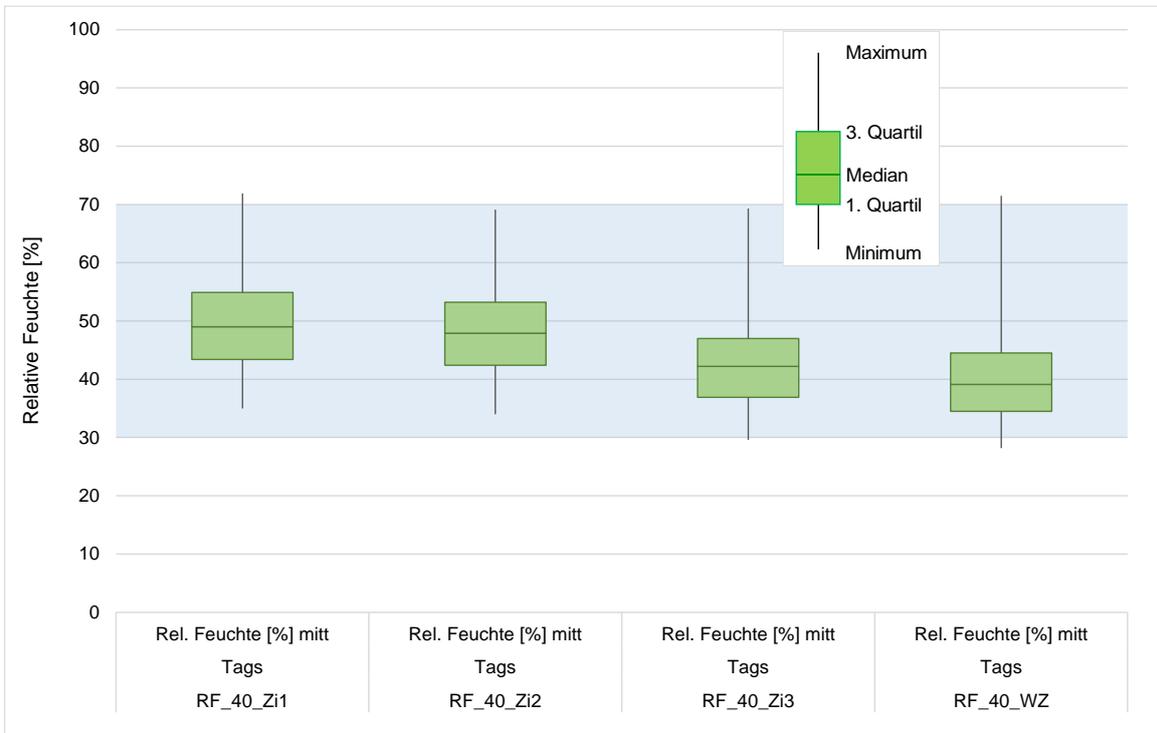


Abbildung 107: Wohnung 2; Auswertung relative Feuchte, Tag

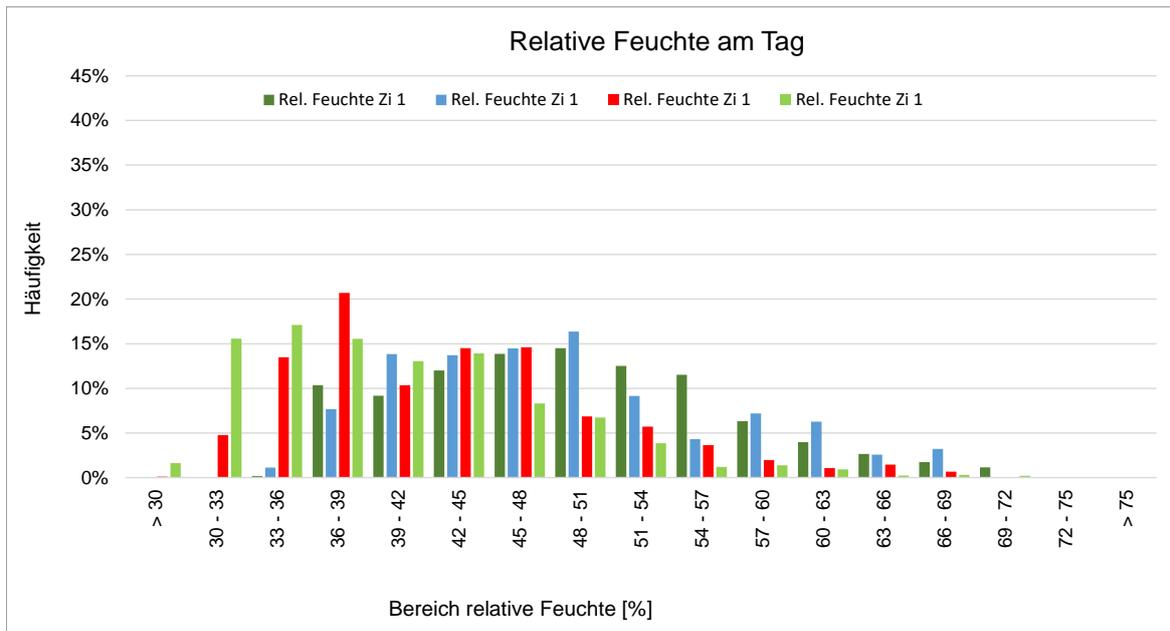


Abbildung 108: Wohnung 2; Auswertung Feuchtebereiche, Tag

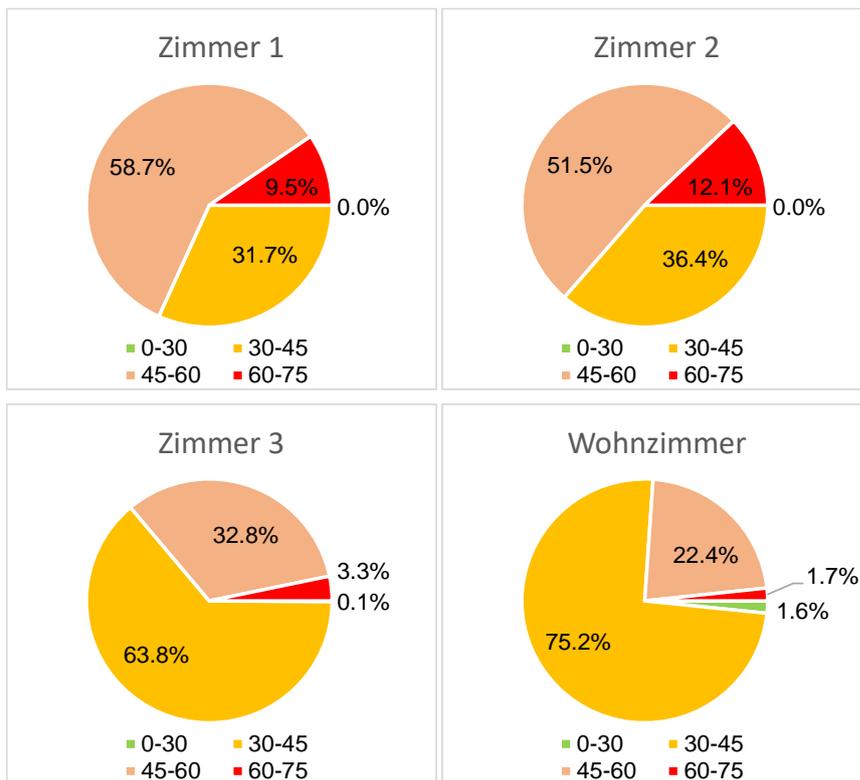


Abbildung 109: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Feuchtebereiche, Tag

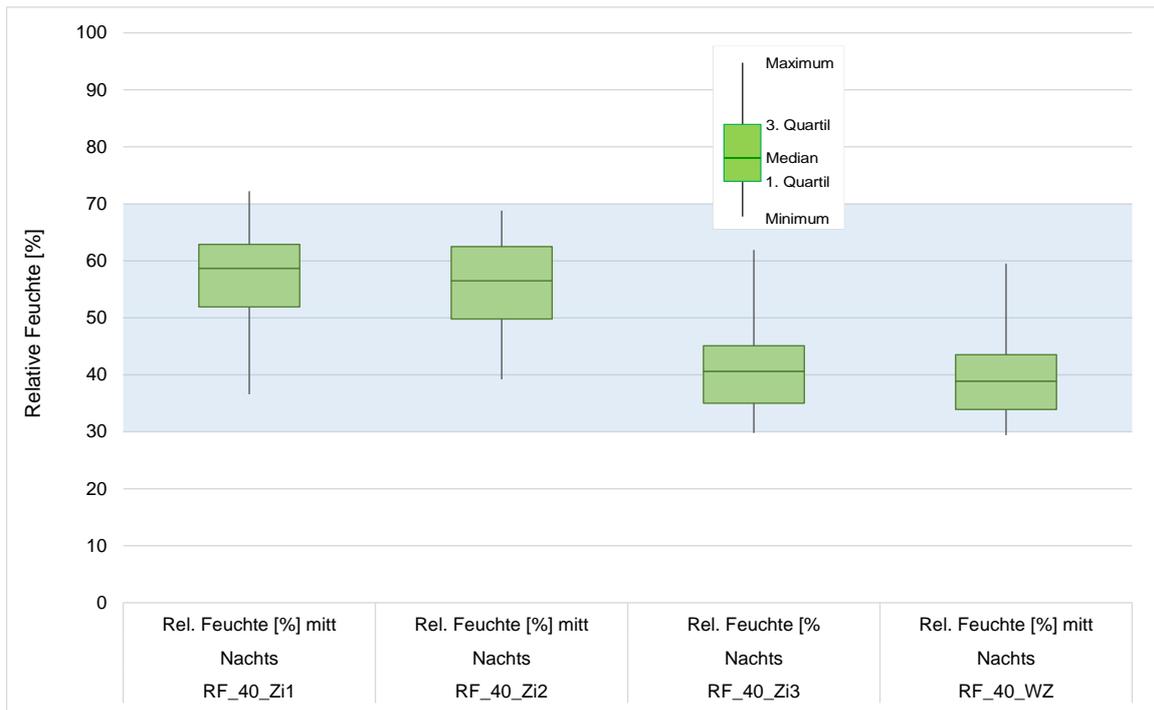


Abbildung 110: Wohnung 2; Auswertung relative Feuchte, Nacht

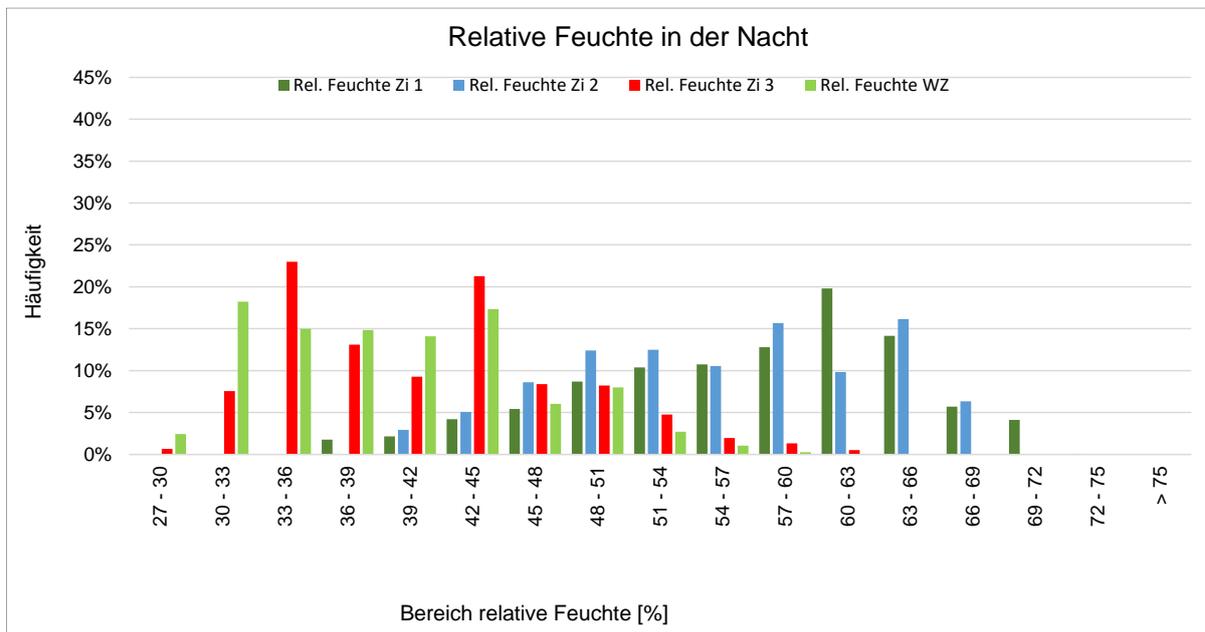


Abbildung 111: Wohnung 2; Auswertung Feuchtebereiche, Nacht

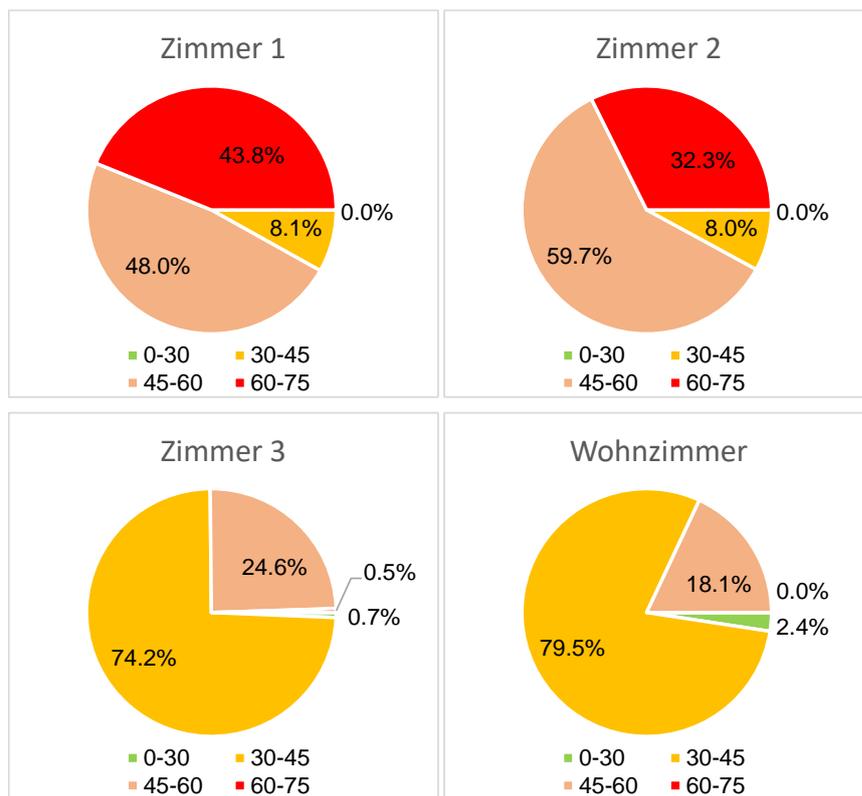


Abbildung 112: Wohnung 2; Auswertung Zeitanteile Feuchtebereiche, Nacht

## 7.4 CFD-Simulation

### 7.4.1 Vergleich Resultate der 1. Modellversion

Die für die Simulation verwendeten Randbedingungen sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Die Modellierung der Atemluftabgabe am Dummy ist in Abbildung 113 und der Grundriss für die CFD-Simulation in Abbildung 114 dargestellt.

Tabelle 10: Zusammenstellung der Randbedingungen für die CFD-Simulationen

Szenario	1.1	1.3	2.4	5.1	5.3 **)	Quelle
<b>Volumenstrom</b>						
Zuluft, [m <sup>3</sup> /h]	60	60	60	60	60	60 Auslegung gem SIA 2023 Kap. 6.4.1, 2.5 Zi-WNG (Szenario x.1..x.5)
Abluft Badezimmer, [m <sup>3</sup> /h]	30	30	30	30	30	30 Auslegung gem SIA 2023 Kap. 6.1.3, 40m <sup>3</sup> /h - 15% Belegung mit max 2 Pers.
Abluft Küche, [m <sup>3</sup> /h]	30	30	30	30	30	30 Auslegung gem SIA 2023 Kap. 6.1.3, 40m <sup>3</sup> /h - 15% Belegung mit max 2 Pers.
Zulufttemperatur, [°C]	22	22	22	22	22	22 Isothermer Fall gleich wie Aussen- / Raumtemperatur. 22°C als typ. Temperatur.
CO <sub>2</sub> -Konzentration, [ppm]	400	400	400	400	400	400 Standardwert 400 ppm für Simulation eingesetzt. (Bereich ca. 400 ...460ppm)
Gitterfläche, [m <sup>2</sup> ]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02 Durchmesser Auslass DN 160
Gitterdimensionen, [Durchmesser]	D = 0.16m	Durchmesser Auslass DN 160				
<b>Interne Lasten</b>						
Beleuchtung, [W/m <sup>2</sup> ]	0	0	0	0	0	0 Basis kein Licht während Nacht
Geräte im Schlafzimmer, [W]	15	0	0	15	0	0 SIA 2024: 2015 (Nutzung MFH; max 8 W/m <sup>2</sup> , nachts 10% gem. Profil) = 15W
Wärmeabgabe sensibel pro Person, [W]	55	55	55	55	55	55 SIA 180: 2014; 3.5.3.3 (ruhig liegend, schlafend)
Davon über Atmung, [W]	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14 Bestimmt aus Temperaturdifferenz und Atemluftvolumenstrom
Hauttemperatur [°C]	33	33	33	33	33	33 Mittelwert Kopf, Oberkörper, Arme, Hände; Abgeschätzt *)
<b>Personenatmen, pro Person</b>						
Anzahl Personen in Zimmer 2	1	2	2	1	2	
Volumenstrom pro Pers., [m <sup>3</sup> /h]	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336	0.336 Basierend auf Wert 5-6 l/min ruhend gem. Björn & Nielsen: 2002
Ablufttemperatur, [°C]	34	34	34	34	34	34 Quelle: Mahyuddin et al., 2015
Abluft CO <sub>2</sub> -Konzentration, [ppm]	36000	36000	36000	36000	36000	36000 gem. Höpfe (1981) in H. Shuguang (2011)
<b>Bodenfläche des "Wohnzimmers", [m<sup>2</sup>]</b>						
	18.3	18.3	18.3	18.3	18.3	
<b>Simulationszeit, [Stunden]</b>						
	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	
<b>Türöffnung, Tür Zimmer 1 [cm]</b>						
	5	5	10	*)	*) , **)	*) Basisvariante mit Adeckungsabstand 20 mm; Varianten in Szenarion 5.3
<b>Gebäudehülle</b>						
Aussentemperatur [°C]	22	22	22	22	22	
U-Wert Fassade [W/m <sup>2</sup> K]	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	
U-Wert Fenster [W/m <sup>2</sup> K]	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	

Berechnungsvarianten in Szenarion 5.3 mit Adeckungsabstand 30mm, 40mm sowie schräger Montage 20/40mm (strömungsoptimiert)

\*) Basis Regressionsmodell: M.D.P. Garcia-Souto, P. Dabnichki; 2013 (mit Raumtemperatur 22°C, RF = 40%, Mittel mvf, Alter 30 J, BMI = 24.5, 0 Kleidungslayer)

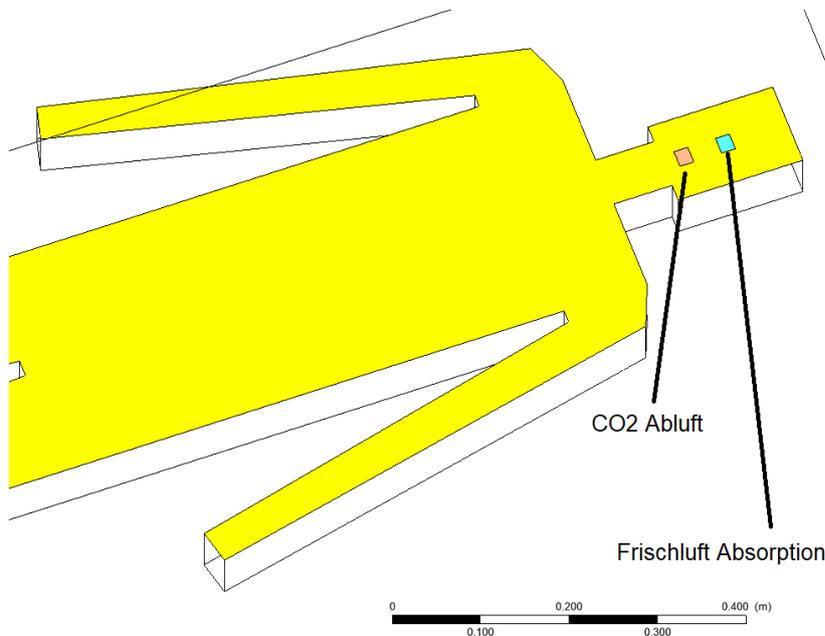


Abbildung 113: Modellierung CO<sub>2</sub>-Abgabe an Dummy in CFD-Simulation

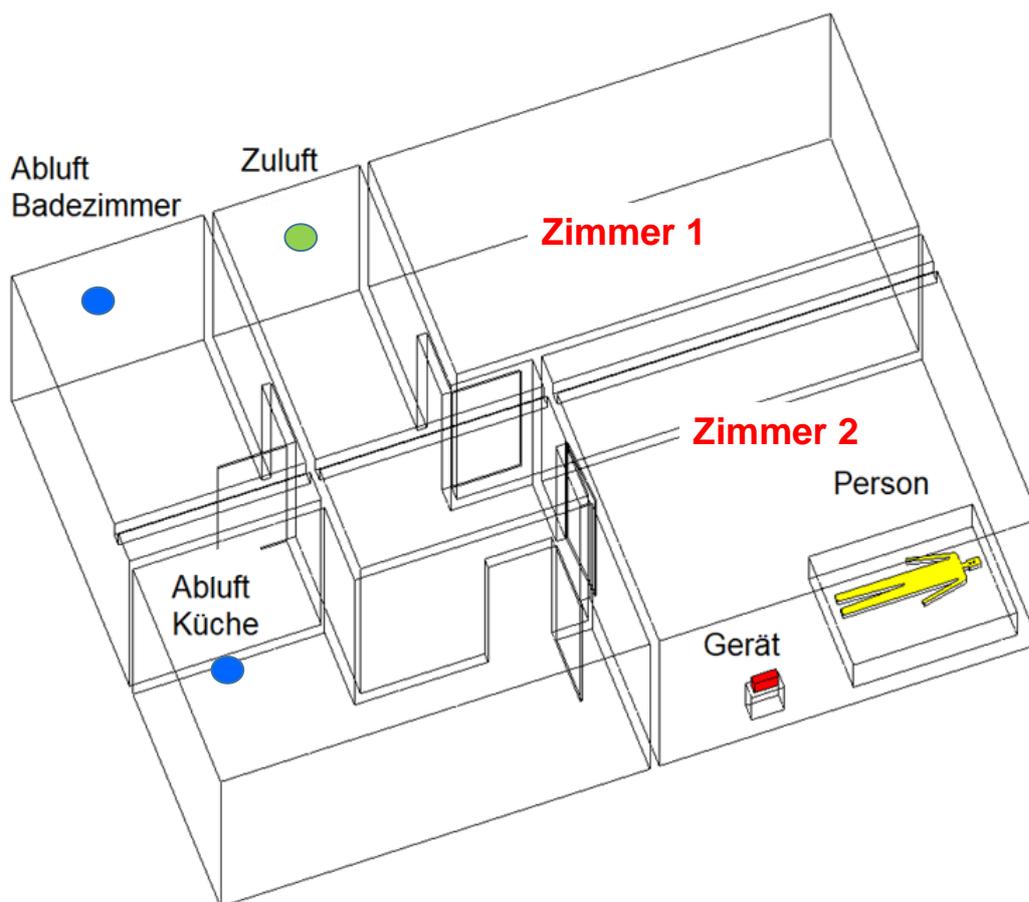


Abbildung 114: Grundriss für CFD-Simulation (Identisch mit Grundriss «ROTEG» Forschungswohnung)

#### 7.4.2 Vergleich Resultate der 1. Modellversion

Das Modell der CFD-Berechnung wurde aufgrund der Resultate der ersten Modellversion überarbeitet und verfeinert. Nachstehend werden die Resultate aus der ersten Modellversion und die durchgeführten Vergleiche mit Messergebnissen dokumentiert.

Die Resultate der CFD-Berechnung vom Szenario 1.3 können mit der Messung aus der Forschungswohnung verglichen werden. Dies ist in Abbildung 79 dargestellt. Beim Vergleich der jeweiligen Mittelwerte über alle Messpunkte im Zimmer zeigt sich ein ähnlicher Verlauf. Unterschiedlich ist der Anstieg zu Messbeginn, der in der CFD-Simulation am nächsten bei den Messwerten in 1.4 m Höhe aus der Forschungswohnung liegt. Nach ca. 2 Stunden nimmt in der CFD-Simulation der Anstieg ab und liegt bei Messende der Messung in Rosenheim (nach 3 Stunden) knapp unter dem Mittelwert der Messung.

Da die Messung in Rosenheim nach 3 Stunden beendet wurde, ist daraus keine klare Aussage über die sich in dieser Messung einstellende Gleichgewichtskonzentration möglich.

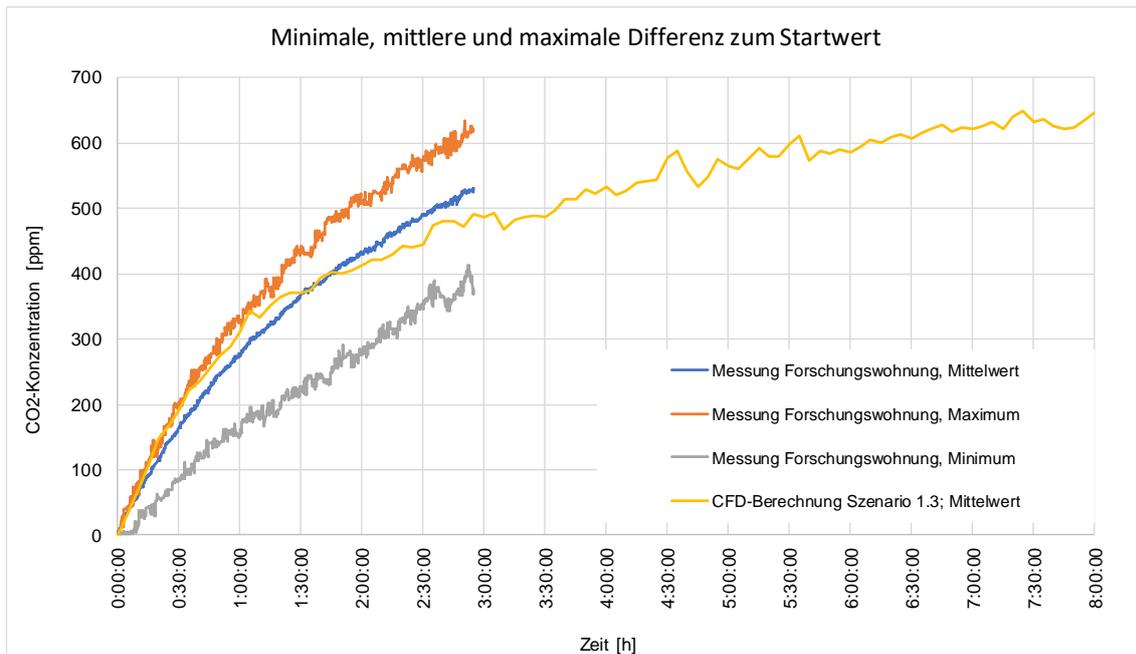


Abbildung 115: Vergleich der Resultate zu Szenario 1.3 aus CFD-Simulation und Messung in Forschungswohnung

Die Resultate der CFD-Berechnung vom Szenario 1.1 (mit reduziertem Volumenstrom) kann grob mit den Messungen aus Testwohnung verglichen werden. Dies ist in Abbildung 80 dargestellt. Der Vergleich zeigt grössere Differenzen insbesondere bei Messbeginn. Auch die Differenz der CO<sub>2</sub>-Konzentration zum Startwert liegt nach acht Stunden in der Messung klar höher als in der Simulation. Die Gründe für diese Differenzen sind in Abklärung.

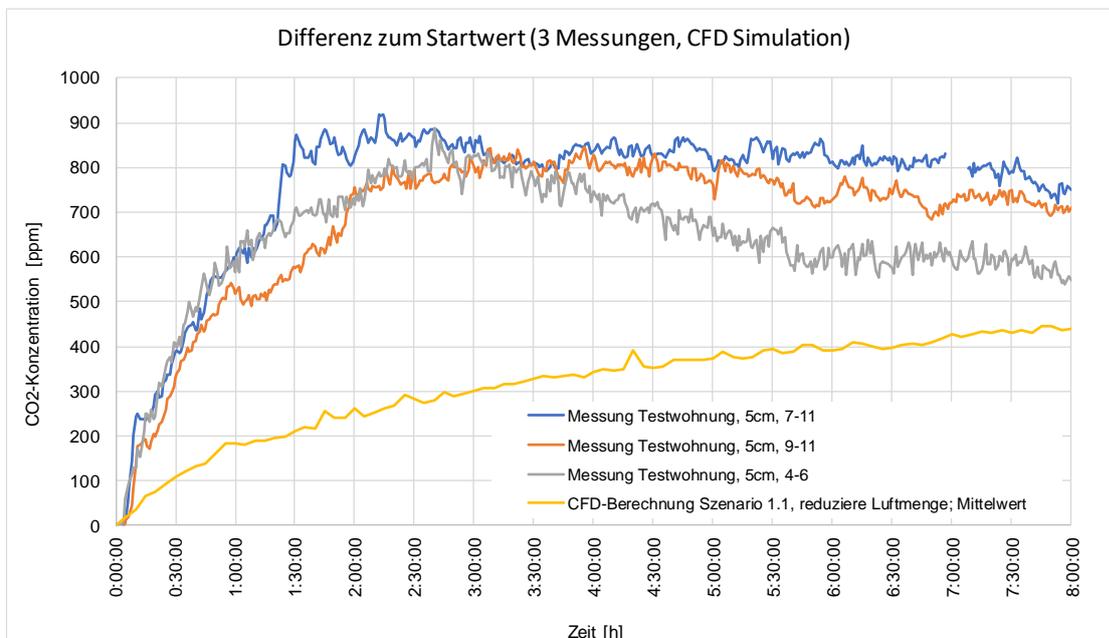


Abbildung 116: Vergleich der Resultate zu Szenario 1.1a aus CFD-Simulation und Messresultaten in Testwohnung

### 7.4.3 Resultatdokumentation CFD-Berechnungen

In Abbildung 117 sind die in der CFD-Simulation erfassten Messpunkte dargestellt. Abbildung 118 zeigt die Resultate aller berechneten Szenarien mit dem überarbeiteten Modell. Die dargestellte Kurve entspricht dem Mittelwert der Messpunkte in Zimmer 2.

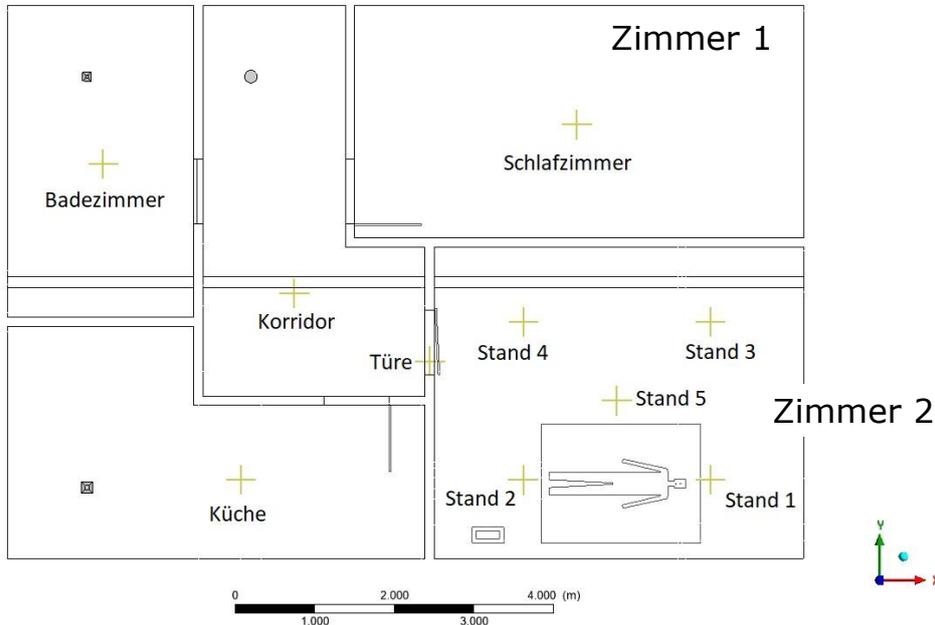


Abbildung 117: Messpunkte im Grundriss der CFD-Simulation für die Resultatauswertung

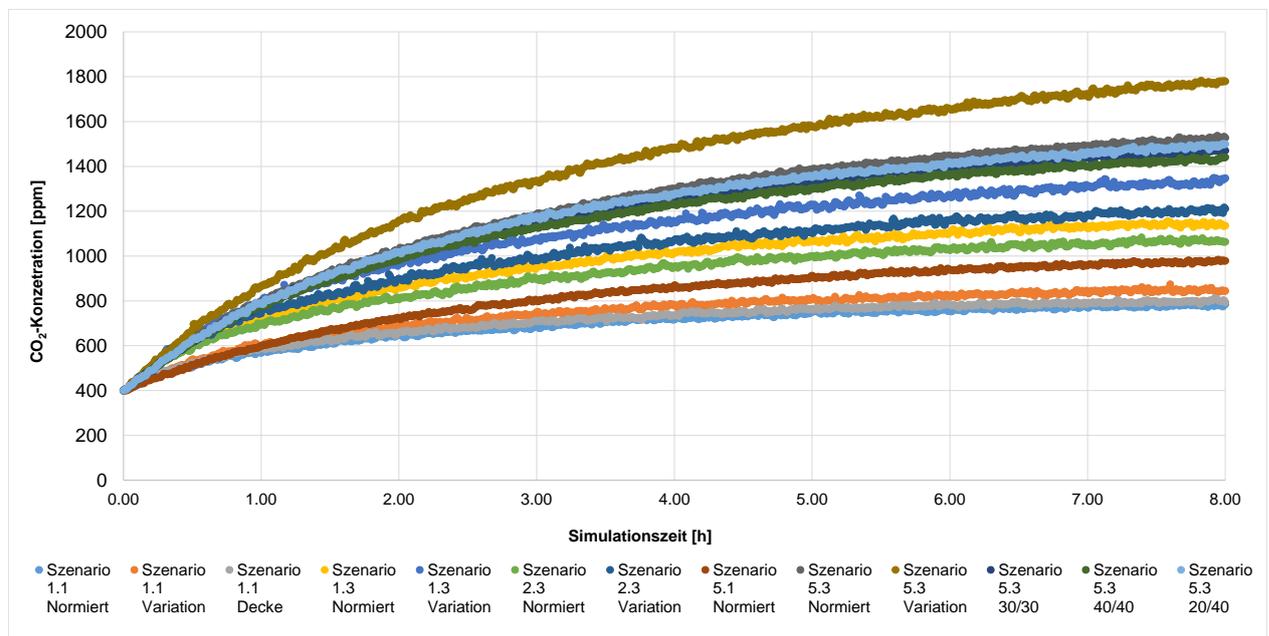
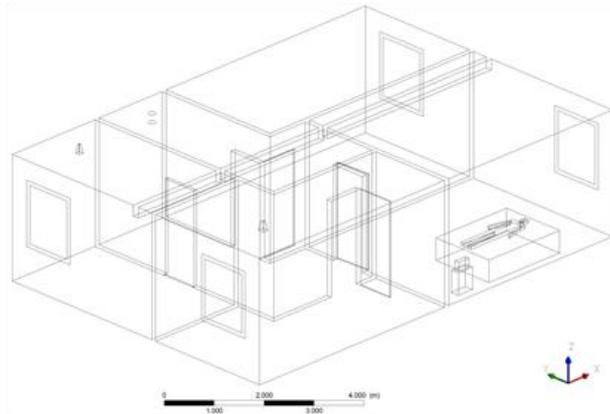


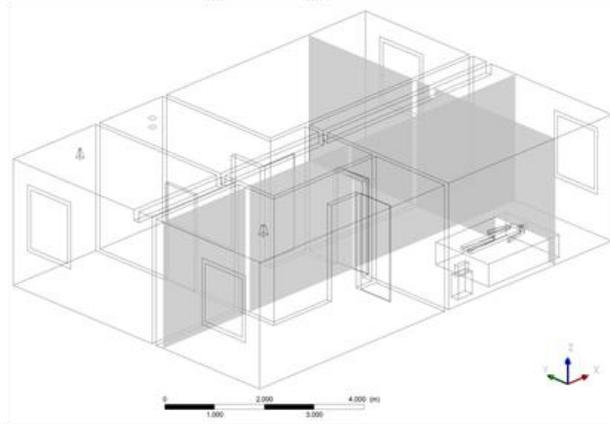
Abbildung 118: Zusammenfassung der Szenarien der CFD-Simulation; Mittelwert der Messpunkte im Zimmer 2

Szenario 1.1

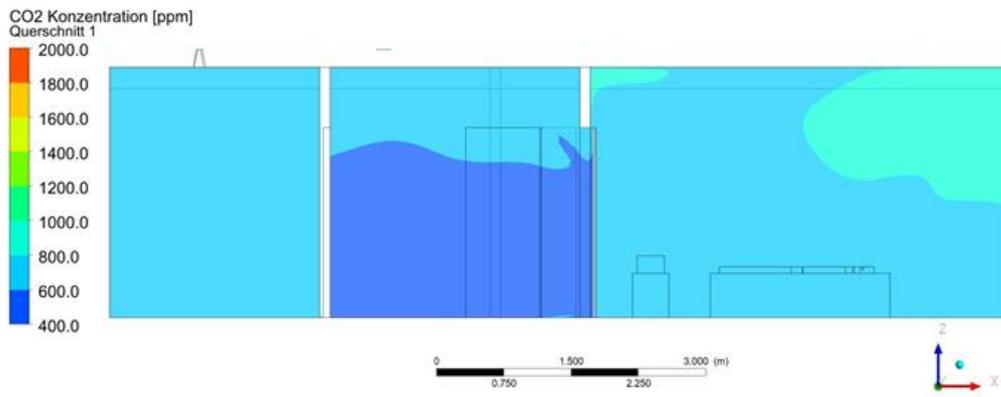
3d-Ansicht



3d-Ansicht mit den Querschnitten



Querschnitt Q1: CO<sub>2</sub>-Konzentration



Schnitt Q2: CO<sub>2</sub>-Konzentration

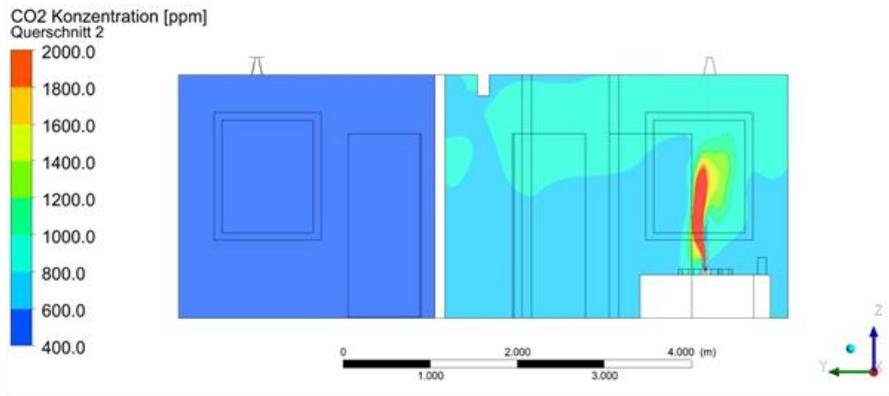
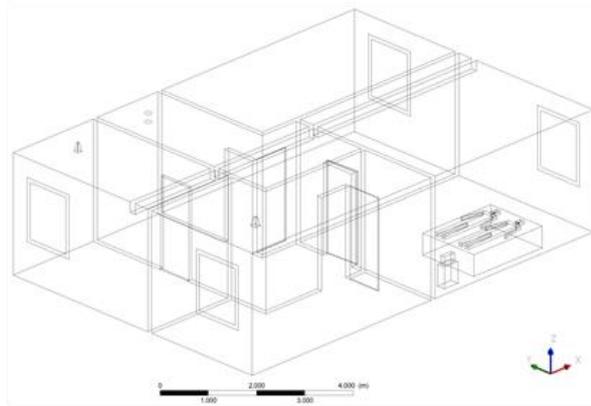


Abbildung 119: Szenario 1.1; Darstellung der Konzentrationsverteilung

## Szenario 1.3

3d-Ansicht



3d-Ansicht mit den Querschnitten

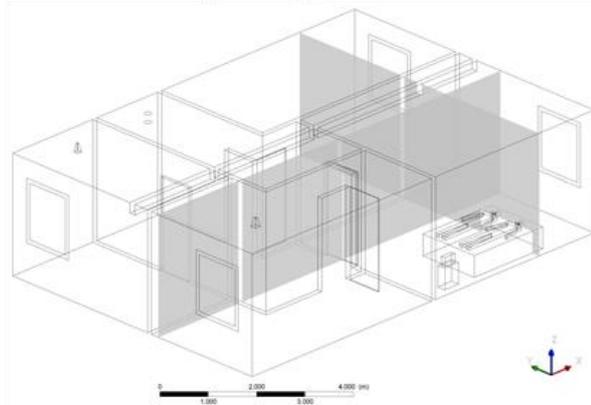
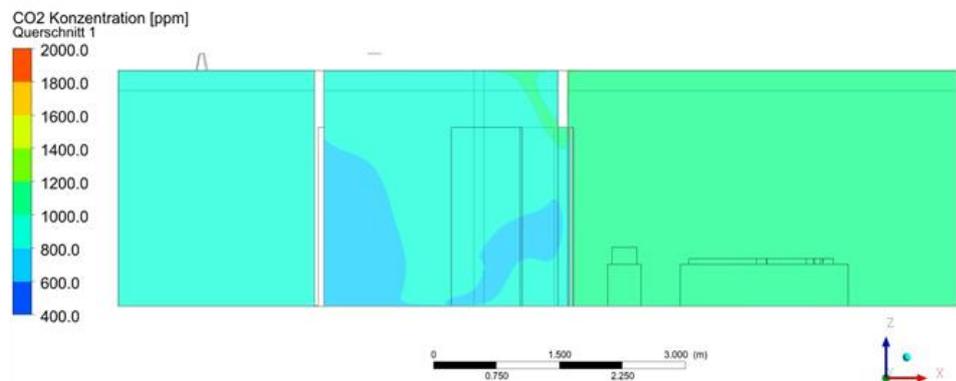
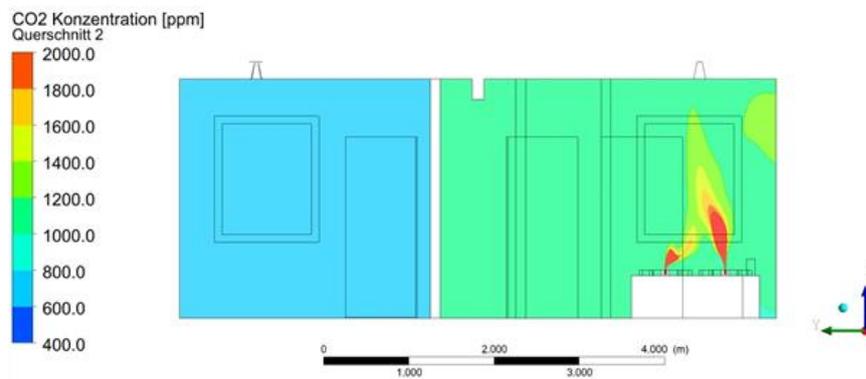
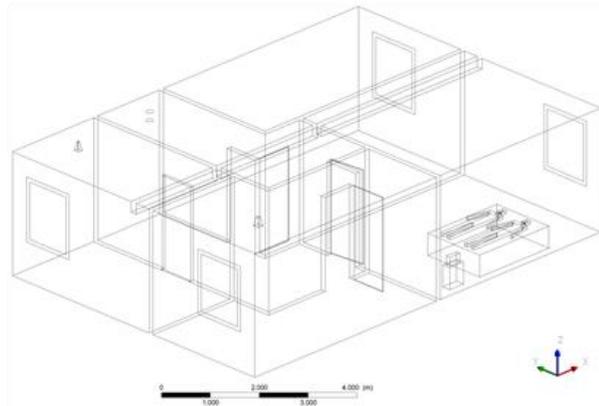
Querschnitt Q1: CO<sub>2</sub>-KonzentrationSchnitt Q2: CO<sub>2</sub>-Konzentration

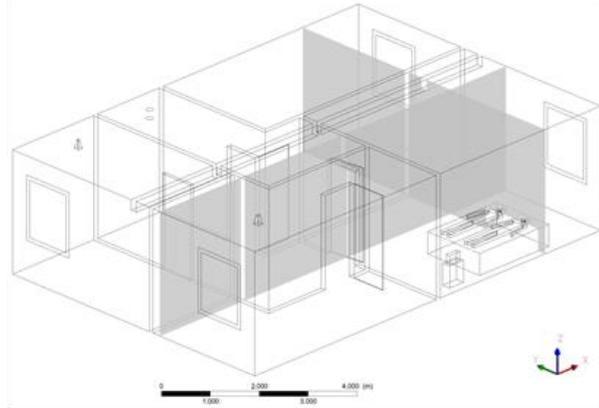
Abbildung 120: Szenario 1.3; Darstellung der Konzentrationsverteilung

Szenario 2.3

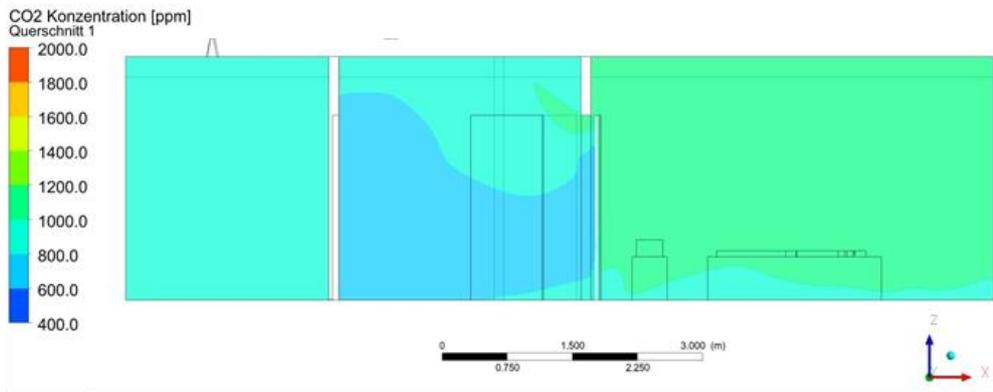
3d-Ansicht



3d-Ansicht mit den Querschnitten



Querschnitt Q1: CO<sub>2</sub>-Konzentration



Schnitt Q2: CO<sub>2</sub>-Konzentration

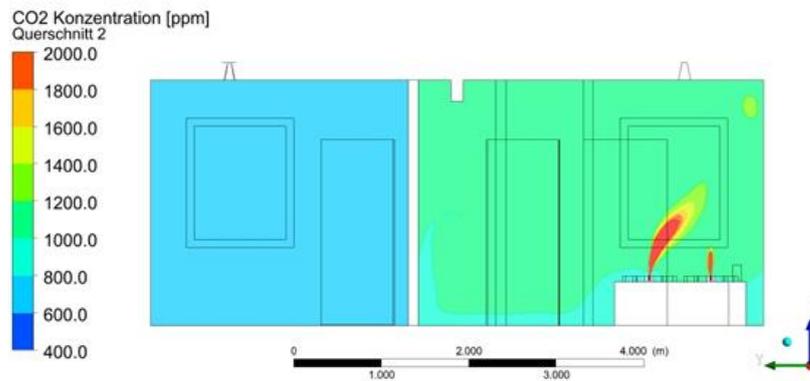
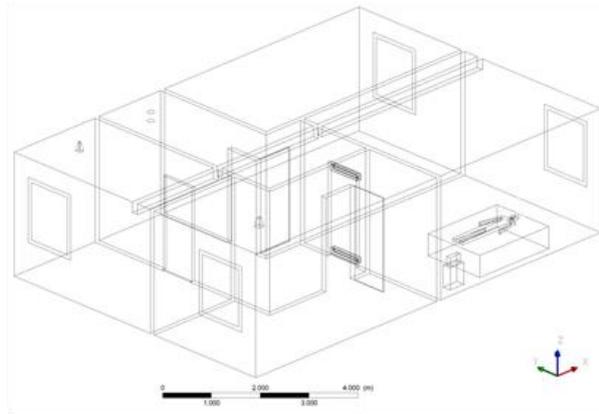


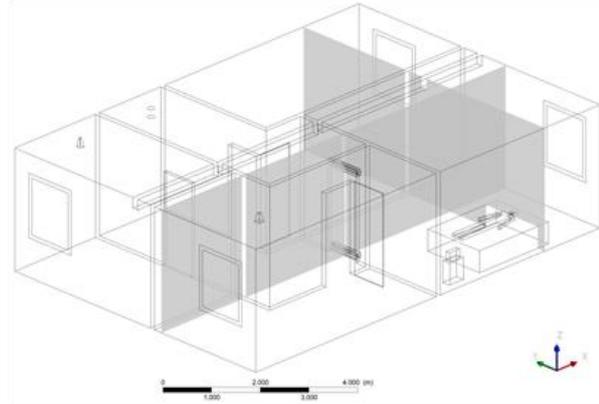
Abbildung 121: Szenario 2.3; Darstellung der Konzentrationsverteilung

Szenario 5.1 20x20

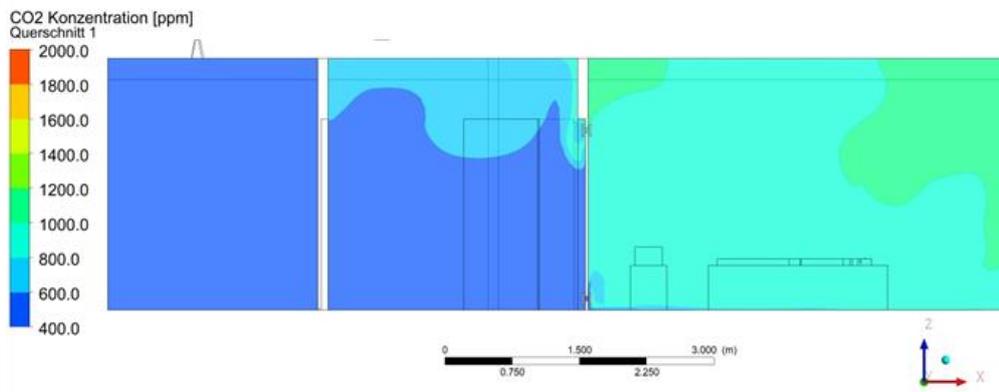
3d-Ansicht



3d-Ansicht mit den Querschnitten



Querschnitt Q1: CO<sub>2</sub>-Konzentration



Schnitt Q2: CO<sub>2</sub>-Konzentration

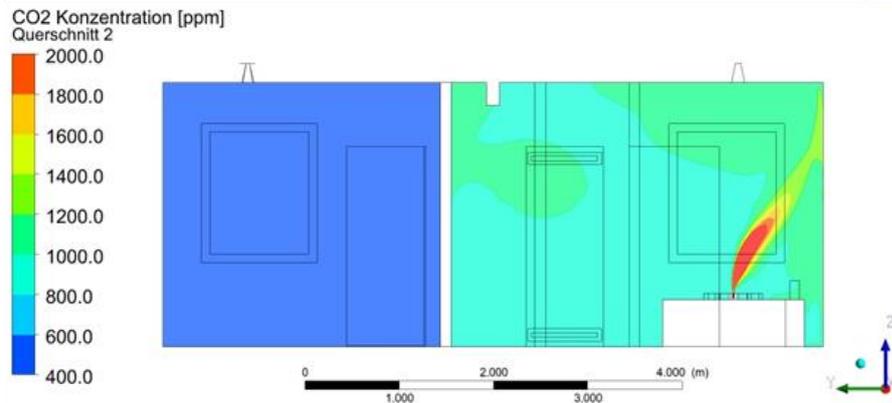
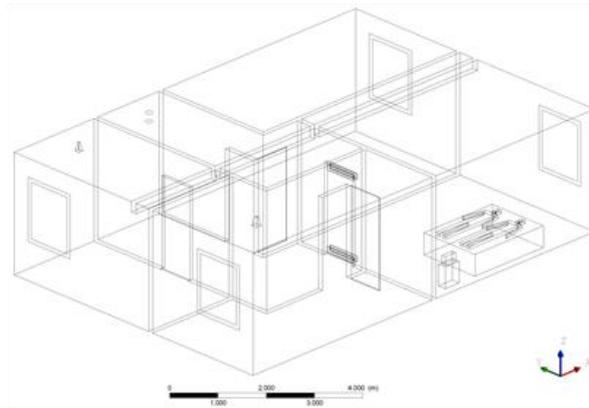


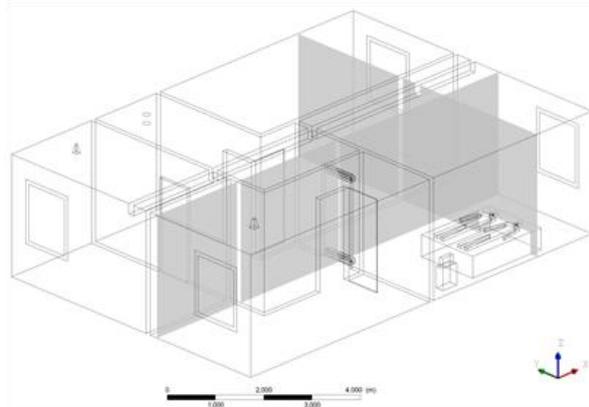
Abbildung 122: Szenario 5.1; Var. 20 / 20 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung

Szenario 5.3 20x20

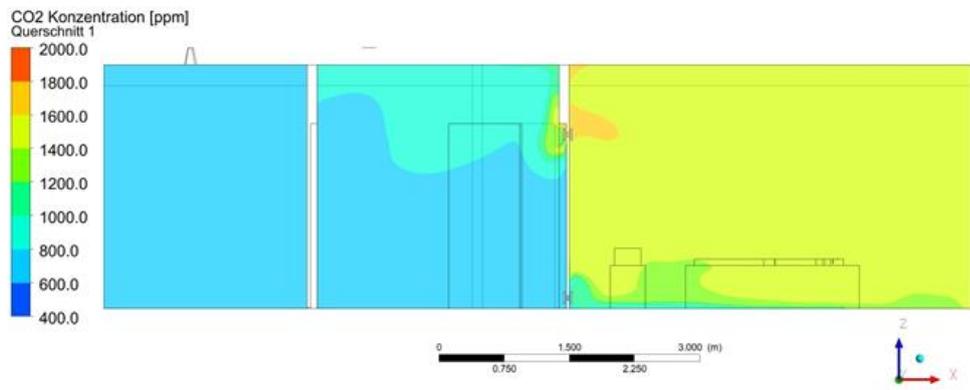
3d-Ansicht



3d-Ansicht mit den Querschnitten



Querschnitt Q1: CO<sub>2</sub>-Konzentration



Schnitt Q2: CO<sub>2</sub>-Konzentration

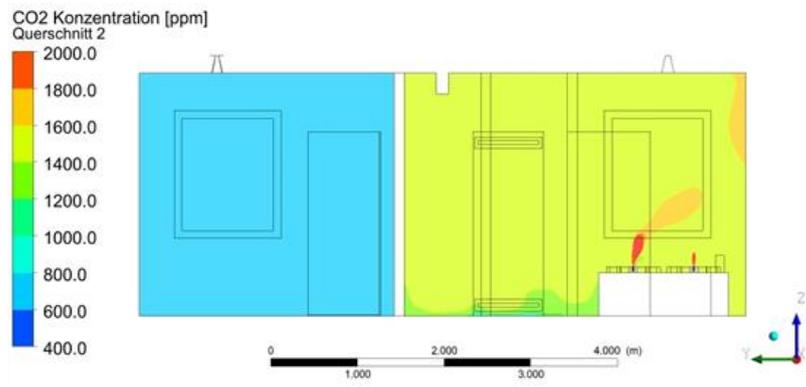
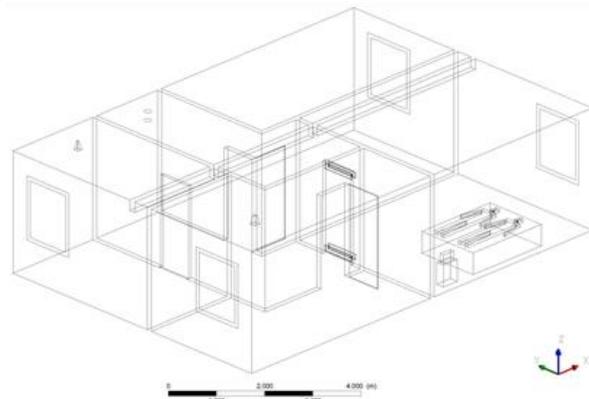


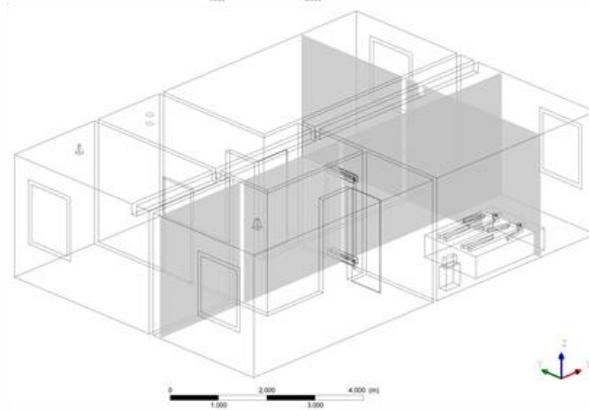
Abbildung 123: Szenario 5.3; Var. 20 / 20 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung

Szenario 5.3 30x30

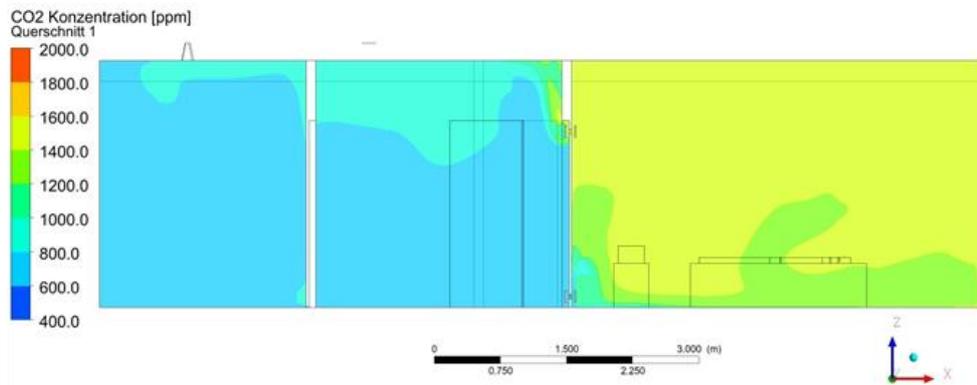
3d-Ansicht



3d-Ansicht mit den Querschnitten



Querschnitt Q1: CO<sub>2</sub>-Konzentration



Schnitt Q2: CO<sub>2</sub>-Konzentration

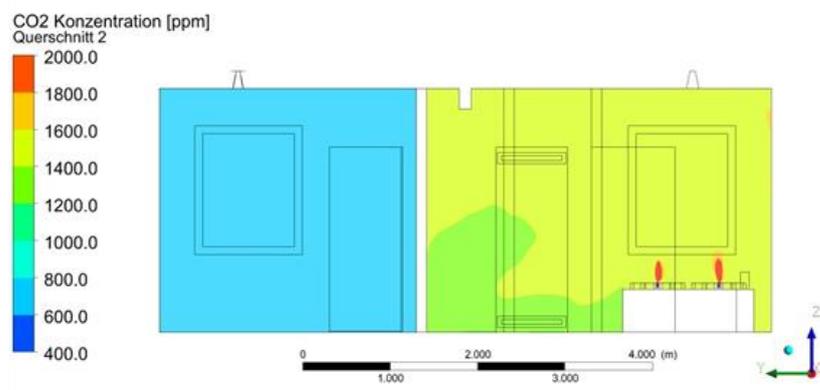
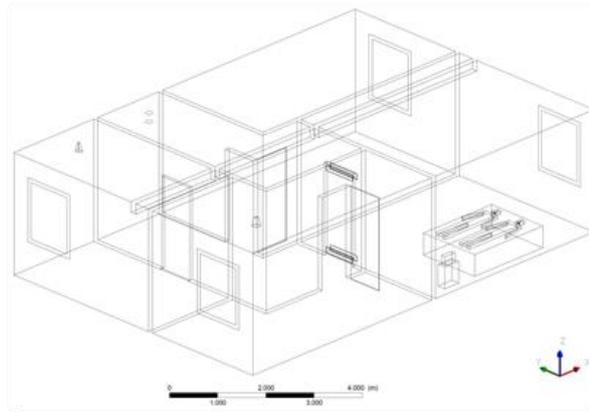


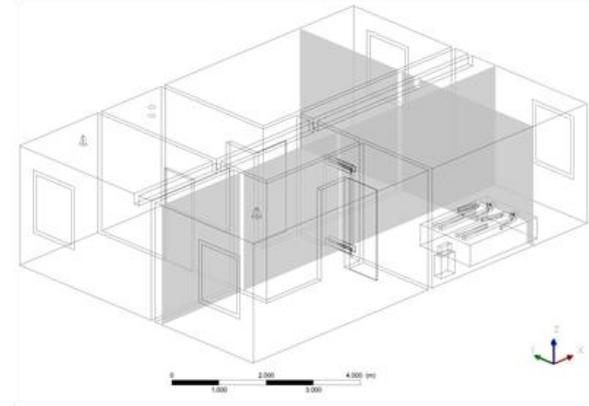
Abbildung 124: Szenario 5.3; Var. 30 / 30 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung

Szenario 5.3 40x40

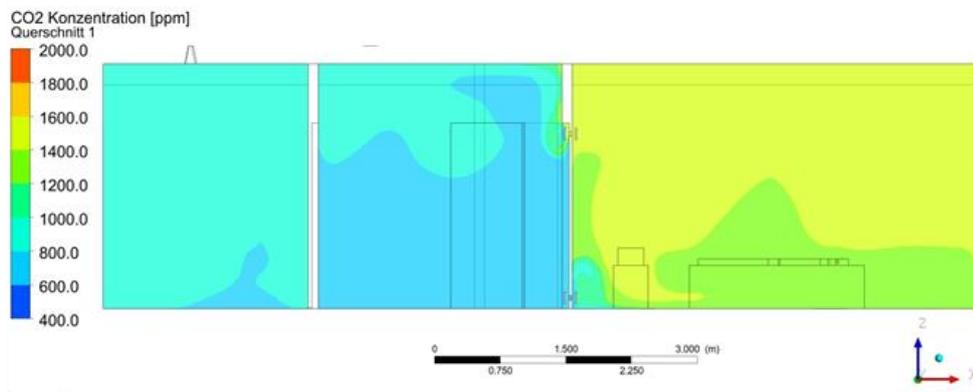
3d-Ansicht



3d-Ansicht mit den Querschnitten



Querschnitt Q1: CO<sub>2</sub>-Konzentration



Schnitt Q2: CO<sub>2</sub>-Konzentration

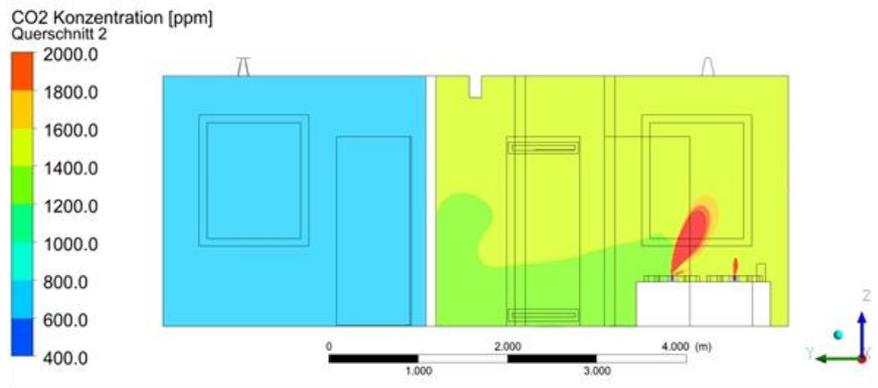
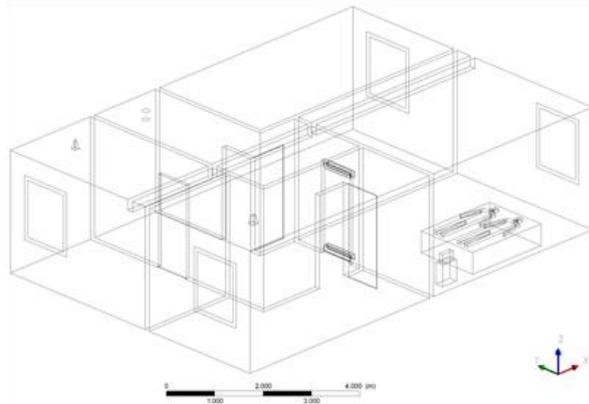


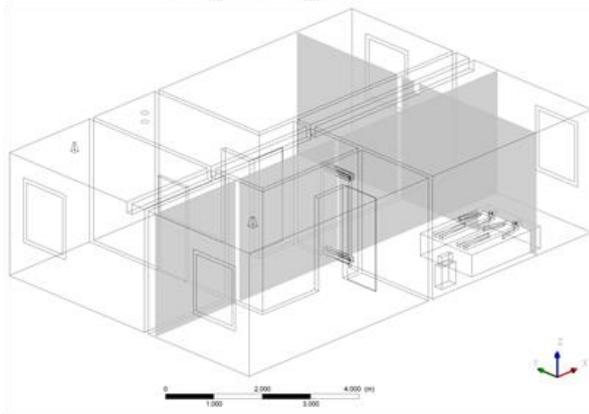
Abbildung 125: Szenario 5.3; Var. 40 / 40 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung

Szenario 5.3 20x40

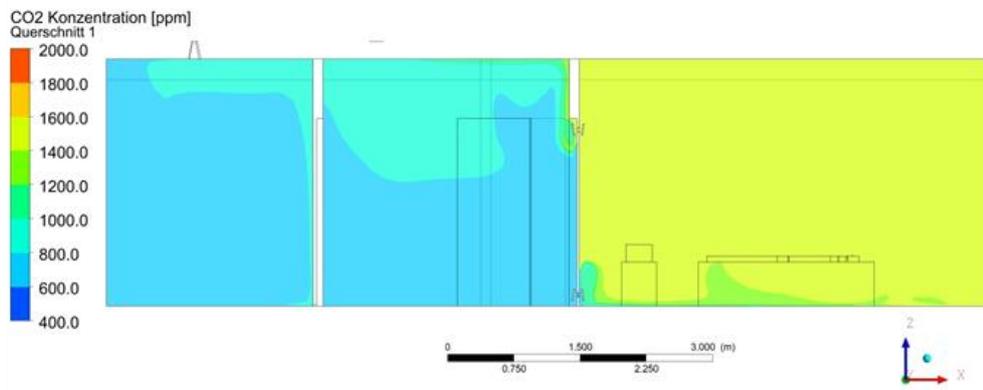
3d-Ansicht



3d-Ansicht mit den Querschnitten



Querschnitt Q1: CO<sub>2</sub>-Konzentration



Schnitt Q2: CO<sub>2</sub>-Konzentration

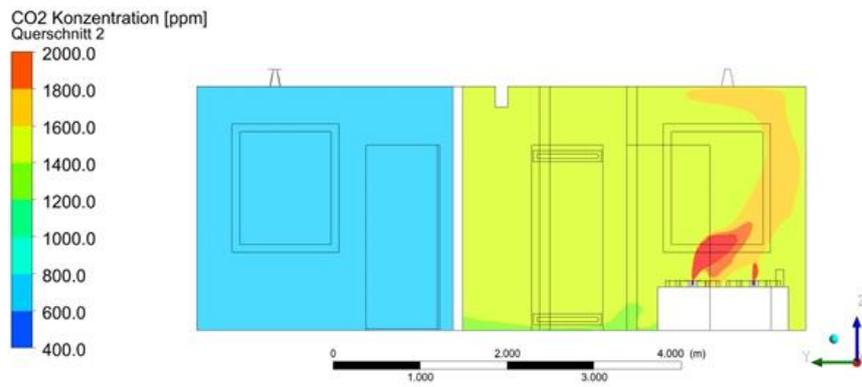


Abbildung 126: Szenario 5.3; Var. 20 / 40 mm; Darstellung der Konzentrationsverteilung